



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH SHORT IMMERSING TIME DAN
LAJU PENDINGINAN PROSES COPPERIZING
TERHADAP PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR
DAN PERILAKU TEMBAGA PADA DEAD MILD
STEEL**

**APRIDA ULYA CUNIKA
NRP. 2712100064**

**Dosen Pembimbing:
Sutarsis, ST., M.Sc.
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.**

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



FINAL PROJECT - TL141584

**EFFECTS OF SHORT IMMERSING TIMES AND
COOLING RATES OFCOPPERIZING PROCESS
ON THE EVOLUTION MICROSTUCTURE AND
COPPER BEHAVIOR IN DEAD MILD STEEL**

**APRIDA ULYA CUNIKA
NRP. 2712100064**

**Advisor:
Sutarsis, ST., M.Sc.
Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.**

**MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**PENGARUH SHORT IMMERSING TIME DAN LAJU
PENDINGINAN PROSES COPPERIZING TERHADAP
PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR DAN PERILAKU
TEMBAGA PADA DEAD MILD STEEL**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

APRIDA ULYA CUNIKA

NRP 2712100064

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, ST., M.Sc. (Pembimbing 1)
2. Rindang Fajarin, S.Si., M.Sc. (Pembimbing 2)



PENGARUH SHORT IMMERSING TIME DAN LAJU PENDINGINAN PROSES COPPERIZING TERHADAP PERUBAHAN MIKROSTRUKTUR DAN PERILAKU TEMBAGA PADA DEAD MILD STEEL

Nama : Aprida Ulya Cunika
NRP : 2712100064
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Dosen Co-Pembimbing : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si

ABSTRAK

Pada *dead mild steel* dengan maksimal 0,15%C tidak banyak memberikan efek penguatan. Dengan penambahan paduan tembaga dapat mencapai keseimbangan kekuatan dan keuletan dengan penghalusan butir, *solid solution*, atau presipitasi Cu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan mikrostruktur dan perilaku tembaga pada baja AISI 1006 meliputi fase yang terbentuk, komposisi, dan persebaran Cu. Metode penambahan tembaga yang digunakan dengan mencelupkan baja ke dalam tembaga cair atau yang disebut metode *copperizing* menggunakan prinsip difusi. Spesimen dipotong dengan dimensi 6x3x0,3cm. Kemudian dilakukan pemanasan awal pada temperatur 900°C dan proses peleburan tembaga pada temperatur 1100°C. Dilanjutkan proses pencelupan spesimen ke tembaga cair dengan waktu *immerse* 5 dan 7 menit, dan variasi laju pendinginan menggunakan *annealing*, *normalizing*, dan *quenching*. Setelah itu dilakukan pengujian struktur mikro, SEM EDX untuk analisis topografi dan persebaran Cu, OES untuk mengetahui komposisi kimia, dan XRD untuk identifikasi fase dan *microstrain*. Hasil pengujian menunjukkan semakin lama waktu celup dan laju pendinginan, semakin banyak kadar Cu yang berdifusi yang menyebabkan luas ukuran butir mengecil yaitu dengan kadar Cu tertinggi yang berdifusi sebesar 0.277% pada baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *annealing* yang menyebabkan luas ukuran

butir mengecil hingga sebesar $11114.6622 \mu\text{m}^2$. Pada spesimen dengan pendinginan anil memperlihatkan fase ferit dan pada pendinginan normal memperlihatkan fase poligonal ferit, sedangkan pada pendinginan *quench* memperlihatkan fase granular bainit. Pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan normal dan *quench* menunjukkan bahwa Cu larut seluruhnya didalam kristal Fe membentuk *solid solution*.

Kata Kunci : *Copperizing*, waktu *immerse*, laju pendinginan, *dead mild steel*, mikrostruktur, fase Cu

EFFECTS OF SHORTIMMERSING TIMES AND COOLING RATES OF COPPERIZING PROCESS ON THE EVOLUTION MICROSTRUCTURE AND COPPER BEHAVIOR IN DEAD MILD STEEL

Name : Aprida Ulya Cunika
NRP : 2711100064
Department : Materials and Metallurgical Engineering
FTI-ITS
Advisor : Sutarsis, S.T., M.Sc.
Co-Advisor : Rindang Fajarin, S.Si., M.Si.

ABSTRACT

In dead mild steel with a maximum of 0.15%C won't contribute many effects to its strengthening. By adding copper as an alloying element, a balance between strength and ductility through grain refinement and solid solution, or Cu precipitation could be obtained. This research aimed to analyze microstructures changes and copper behavior in AISI 1006 including phases formed, composition, and Cu distribution. Method of copper addition used in this research was called *copperizing*, which is done by immersing steel into molten copper and taken advantage of diffusion principle. Specimens were cut into 6x3x0.3cm smaller pieces. Then, preheated the specimens to 900°C and melting the copper simultaneously at 1100°C in different heat-processing. Next, immersion process of the specimens into molten copper was done with different immersion times, which were 5 and 7 minutes. Subsequently, the specimens were also cooled down in three different ways, which were *annealed*, *normalized*, and *quenched*. Tests were ready to be conducted to these specimens. The tests conducted were microstructural analysis, SEM-EDX test to observe topography and Cu distribution, OES to determine the chemical composition of the specimens, and lastly XRD to identify the phases and *microstrain*. The results show that the longer the immersion time and cooling, the higher the Cu diffusion. These results in smaller

grain area with the highest level of Cu successfully diffused in a specimen were 0.277%. These phenomena refer to the AISI 1006 *copperized* for 7 minutes and then annealed which reduce its grain area up to 11114.6622 μm^2 . The structural analysis for the annealed specimens show that they are mainly composed of ferrites and for the normalized ones, they were composed of polygonal ferrites and the quenched ones show the presence of granular bainites. In the normalized-copperized and the quenched-copperized specimens, it can be seen that Cu was dissolved into Fe crystals to form a *solid solution*.

Keywords: *Copperizing*, immersing time, cooling rate, dead mild steel, microstructure, phase Cu

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan limpahan karunia sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan laporan Tugas Akhir dengan judul *“Pengaruh Short Immersing Time dan Laju Pendinginan Proses Copperizing Terhadap Perubahan Mikrostruktur dan Perilaku Tembaga Pada Dead Mild Steel”*.

Terima kasih kepada semua pihak yang berperan pada penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan kakak saya yang telah memberikan doa, dukungan, dan semangat yang sangat berguna.
2. Sutarsis, S.T., M.Sc. dan Rindang Fajarin, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi kepada penulis.
3. Bapak Chanan, pak Tari, mas Anto, mas Asmandan mbak Is selama perjalanan penelitian Tugas Akhir
4. Seluruh MT 14 yang selalu saling menguatkan dalam usaha dan doa untuk kesuksesan.
5. Firstiand Kevin Chaniago yang selalu memberi doa, bantuan, dan dukungan untuk penulis.
6. Sahabat-sahabat saya di geng gong yang selalu memberi semangat dan selalu menemani saat suka dan duka
7. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi atas penulisan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan, dibalik itu terdapat niat tulus untuk berbagi pengetahuan bagi sesama. Penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan pembaca.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	2
I.3 Batasan Masalah	2
I.4 Tujuan Penelitian	3
I.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1 Baja Karbon	5
II.1.1 Baja AISI 1006	6
II.1.2 Klasifikasi Sistem Mikrostruktur Ferit Baja Karbon Rendah	7
II.2 Baja <i>High Strength Low Alloy</i> (HSLA)	12
II.2.1 Mekanisme Penguatan Pada HSLA	13
II.3 Tembaga	18
II.3.1 Sistem Fe-Cu	21
II.3.2 Pengaruh Cu Terhadap Baja	23
II.4 Difusi	25
II.4.1 Difusi Cu-Fe	26
II.4.2 Perilaku Difusi Tembaga dalam Baja	26
II.5 Laju Pendinginan	29
II.6 Penelitian Sebelumnya	31
II.6.1 Efek Cu Terhadap Struktur Mikro	31
II.6.2 Pembentukan Produk Ferit Selama Pendinginan Kontinyu Pada Baja HSLA Cu-bearing	37
BAB III METODOLOGI	41
III.1 Bahan dan Alat Penelitian	41

III.1.1	Bahan Penelitian.....	41
III.1.2	Alat Penelitian.....	41
III.2	Diagram Alir.....	42
III.3	Prosedur Penelitian.....	44
III.3.1	Preparasi Sampel Awal.....	44
III.3.2	Preparasi Peleburan Tembaga	44
III.3.3	Peleburan Tembaga dan Pemanasan Baja	45
III.3.4	Proses <i>Copperizing</i>	45
III.3.5	Pengujian.....	45
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
IV.1	Hasil Pengamatan Makro	49
IV.2	Hasil Pengujian OES.....	52
IV.3	Hasil Pengamatan Struktur Mikro.....	54
IV.3.1	Pengaruh Waktu Celup Terhadap Struktur Mikro.....	54
IV.3.2	Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Struktur Mikro.....	66
IV.4	Hasil Pengujian XRD	72
IV.5	Hasil Pengujian SEM EDX	82
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	89
V.1	Kesimpulan.....	89
V.2	Saran.....	89
DAFTAR PUSTAKA.....		xxiii
LAMPIRAN		
I.	Perhitungan Ukuran Butir (Metode Heyn Intercept)	
II.	Analisis Hasil XRD	
III.	PDF CARD	
IV.	Hasil Uji <i>Optical Emission Spectroscopy</i>	
V.	Hasil Uji SEM EDX	
BIODATA PENULIS.....		xxvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram fase Fe-Fe ₃ C	6
Gambar 2.2	Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06%C, 1.45%Mn, 1.25%Cu, 0.97%Ni, 0.72%Cr, dan 0.42%Mo. PF, poligonal ferit; WF, Widmanstatten ferit; AF; acicular ferit; GF' granular ferit.....	7
Gambar 2.3	Poligonal ferit (struktur terang) dari baja HSLA-80 dengan transformasi isothermal pada 675°C. Martensit (struktur gelap) dibentuk selama pendinginan dalam austenit <i>untransformed</i> setelah ditahan isothermal. Struktur mikro, etsa nital	8
Gambar 2.4	Quasi poligonal ferit yang terbentuk dari baja <i>ultra-low carbon</i> yang mengandung 0.003%C dan 3.00%Mn didinginkan pada 50°C/s. Mikroskop optik.....	9
Gambar 2.5	Acicular ferit yang terbentuk dengan transformasi isothermal yang mengandung tembaga pada baja HSLA-80 selama 5000s pada 500°C. Mikroskop optik, etsa nital	10
Gambar 2.6	Granular ferit yang terbentuk dari pendinginan kontinyu pada baja modifikasi A710 dengan komposisi 0.33%C, 1.44%Mn, 1.20%Cu, 2.19%Ni, 0.67%Cr, dan 0.46%Mo. Mikroskop optik.....	11
Gambar 2.7	Pengaruh ukuran butir ferit terhadap kekuatan luluh dan sifat impak (D.T Llewellyn, 1992)	15
Gambar 2.8	Perubahan ukuran butir dengan <i>pre-aging time</i> (Takaki et. al., 2004)	15

Gambar 2.9 Efek penguatan solid solution dalam ferit-perlit baja high-strength low-alloy (D.T Llewellyn, 1992)	16
Gambar 2.10 Keseimbangan TS- <i>Elongation</i> pada baja tanpa Cu dan 4%Cu (Takaki et. al, 2004)	18
Gambar 2.11 Struktur mikro tembaga C10200, <i>hot-rolled bar</i> ..	21
Gambar 2.12 :Sistem Fe-Cu. (A)Perhitungan diagram fase lengkap. Garis titik-titik merepresentasikan liquidus untuk <i>metastable miscibility gap</i> . (B)Detail sisi yang kaya Fe, berdasarkan pada perhitungan CVM. Perhatikan ada sedikit perbedaan temperatur eutektoid dibandingkan dengan (A). Komposisi diungkapkan dalam % atom untuk memfasilitasi perbandingan dengan perhitungan diagram Fe-Cu (Madeleine Durand, 2003).	22
Gambar 2.13 Efek kandungan tembaga pada baja karbon terhadap korosinya dalam atmosfer (4 tahun), (Groysman, 2010).....	24
Gambar 2.14 Skematik yang menunjukkan (a) <i>vacancy diffusion</i> , dan (b)interstitial diffusion (Callister, 2007).....	25
Gambar 2.15 Hasil pengamatan (a)mikrostruktur dan (b)SEM-EDX dari permukaan yang telah melalui proses <i>copper brazing</i>	27
Gambar 2.16 Skema lokasi dari Cu pada pertemuan 3 batas butir dari struktur penyusun utama ferrite - α	29
Gambar 2.17 Diagram CCT untuk 1.5 wt% Cu yang terkandung pada baja <i>microalloyed</i>	31
Gambar 2.18 (a)Gambar hasil optik sampel Ti-B <i>Microalloyed</i> yang menunjukkan daerah perlit gelap, (b)Gambar	

	hasil SEM pada sampel sama yang menunjukkan fase perlit pengaruh etsa	32
Gambar 2.19	(a) Gambar optik sampel baja 1.5 Cu-Ti-B yang menunjukkan mikrostruktur ferit halus dengan distribusi <i>dark islands</i> , (b) Gambar SEM menunjukkan distribusi martensit (α') dan <i>quasi-polygonal ferrite</i> (α_q) dan acicular ferit (α_a)	33
Gambar 2.20	Hasil mikroskop optik yang menunjukkan mikrostrukture setelah aging 30 menit untuk baja A, baja B, dan baja C (a, b, c) hanya <i>aging</i> (d, e, f) <i>cool deformation</i> pada tengangan 0.2	35
Gambar 2.21	Diagram <i>Continuous Cooling Transformation</i> untuk A710 <i>Modified</i> ; M= Martensit, GB= Granular bainit, PF= Proeutectoid ferit	36
Gambar 2.22	Mikrostruktur HSLA-80/A710 menunjukkan proeutektoid dan acicular ferit. Beberapa juga menunjukkan granular bainit	37
Gambar 2.23	Kekerasan dengan mikrostruktur yang dihasilkan pada laju pendinginan berbeda: (a) pendinginan air; (b) ~ 375°C/s; (b) 27.7°C/s; (d) 5 °C/s; (e) 1 °C/s; (f) 0.1 °C/s	39
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	43
Gambar 4.1	Hasil pengambilan gambar visual permukaan baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> selama 5 menit dengan laju pendinginan (a) anil, (b) normal, (c) <i>quench</i> , dan setelah <i>copperizing</i> selama 7 menit dengan variasi laju pendinginan (d) anil, (e) normal, (f) <i>quench</i>	49
Gambar 4.2	Hasil pengambilan gambar dengan mikroskop stereo bagian penampang melintang baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> pendinginan anil dengan waktu celup (a) 5 menit, (b) 7 menit, setelah	

	<i>copperizing</i> pendinginan normal dengan waktu celup (c)5 menit, (d)7 menit, dan setelah <i>copperizing</i> pendinginan quench dengan waktu celup (e)5 menit, (f)7 menit.....	51
Gambar 4.3	Grafik perbandingan komposisi tembaga masing-masing spesimen uji	53
Gambar 4.4	Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>annealing</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum <i>copperizing</i> perlakuan <i>annealing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tengah, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tengah	55
Gambar 4.5	Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>annealing</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum <i>copperizing</i> perlakuan <i>annealing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tepi, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tepi.....	57
Gambar 4.6	Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah <i>copperizing</i> dengan pendinginan <i>furnace (annealing)</i> pada bagian tengah dan tepi.....	58
Gambar 4.7	Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>normalizing</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum <i>copperizing</i> perlakuan <i>normalizing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tengah, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tengah.....	59
Gambar 4.8	Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>normalizing</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum <i>copperizin</i> gperlakuan <i>normalizing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tepi, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tepi	60
Gambar 4.9	Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah <i>copperizing</i> dengan pendinginan udara (<i>normalizing</i>) pada bagian tengah dan tepi.....	61
Gambar 4.10	Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>quenching</i> menggunakan perbesaran 200x untuk	

spesimen (a)sebelum <i>copperizing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tengah, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tengah.....	63
Gambar 4.11 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan <i>quenching</i> menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum <i>copperizing</i> , (b) <i>copperizing</i> 5 menit bagian tepi, (c) <i>copperizing</i> 7 menit bagian tepi.....	64
Gambar 4.12 Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah <i>copperizing</i> dengan pendinginan cepat media air (<i>quenching</i>) pada bagian tengah dan tepi	65
Gambar 4.13 Struktur mikro baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> selama 5 menit menggunakan perbesaran 200x (a)pendinginan anil, (b)pendinginan normal, dan (c)pendinginan media air/ <i>quench</i>	67
Gambar 4.14 Hasil uji fasa dengan SEM EDX pada spesimen baja AISI 1006 <i>copperizing</i> 5 menit pendinginan anil di bagian batas butir	68
Gambar 4.15 Struktur mikro baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> selama 7 menit menggunakan perbesaran 200x (a)pendinginan anil, (b)pendinginan normal, dan (c)pendinginan media air/ <i>quench</i>	70
Gambar 4.16 Perbandingan luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah <i>copperizing</i> pada bagian tengah dengan berbagai variasi laju pendinginan	71
Gambar 4.17 Grafik XRD Baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan	72
Gambar 4.18 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan <i>annealing</i> , (b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan anil.....	73
Gambar 4.19 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan <i>normalizing</i> , (b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan normal	76

Gambar 4.20 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan *quenching*(b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan *quench*.....79

Gambar 4.21 Perbandingan *microstrain* spesimen uji sebelum dan setelah *copperizing* berdasarkan hasil XRD..81

Gambar 4.22 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX perbesaran 1000x pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* pendinginan anil di bagian tengah waktu celup (a)5 menit, (b) 7 menit..... 83

Gambar 4.23 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX perbesaran 1000x pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* pendinginan normal di bagian tengah waktu celup (a)5 menit, (b)7 menit85

Gambar 4.24 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *quench* di bagian tengah perbesaran 1000x 87

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi kimia baja AISI 1006 (ASTM A510).....	7
Tabel 2.2	Koefisien penguatan untuk baja ferit-perlit (D.T Llewellyn, 1992).....	17
Tabel 2.3	Sifat-sifat dari tembaga murni (Kundig, et.al., 2006).....	19
Tabel 2.4	Komposisi kimia baja yang diinvestigasi (wt%)	31
Tabel 2.5	Komposisi Kimia baja (wt%)	34
Tabel 2.6	Komposisi kimia (dalam wt%) pada baja HSLA80 yang diinvestigasi	38
Tabel 3.1	Hasil uji komposisi OES pada plat sampel awal.....	44
Tabel 4.1	Komposisi Baja AISI 1006 Hasil Uji OES Masing-masing Spesimen Uji.....	52
Tabel 4.2	Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 <i>copperizing</i> dengan pendinginan anil	75
Tabel 4.3	Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 <i>copperizing</i> dengan pendinginan normal.....	77
Tabel 4.4	Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 <i>copperizing</i> dengan pendinginan <i>quench</i>	80
Tabel 4.5	Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 <i>copperizing</i> dengan pendinginan anil	84
Tabel 4.6	Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 <i>copperizing</i> waktu celup 5 menit dan 7 menit pendinginan normal.....	86
Tabel 4.7	Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 <i>copperizing</i> 7 menit pendinginan <i>quench</i>	87



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Baja karbon (*plain carbon steel*) merupakan baja yang mengandung unsur paduan utama yaitu karbon. Baja karbon mengandung maksimum 1,5% karbon dan unsur paduan lainnya seperti tembaga, mangan, silikon. Baja dengan kandungan karbon rendah memiliki sifat yang sama seperti besi. Dengan meningkatnya kadar karbon, logam akan menjadi lebih keras dan lebih kuat tetapi keuletannya berkurang dan lebih sulit untuk dilas. Kadar karbon yang lebih tinggi menurunkan titik lebur dan ketahanan temperaturnya. Kadar karbon tidak dapat mengubah kekuatan luluh material (Sanjib Kumar Jaypuria, 2008). Pada *Dead mild steel* yang mengandung karbon maksimal 015% merespon perlakuan panas sebagai perbaikan keuletan tetapi tidak banyak memberikan efek pada sifat kekuatannya.

Di sisi lain tembaga merupakan satu dari logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di industri. Sifatnya lunak, *malleable* (dapat ditempa), dan merupakan material ulet dengan tampilan coklat kemerah-merahan. Kekuatan tarik bervariasi dari 150 MPa hingga 400 MPa dibawah kondisi yang berbeda dan merupakan konduktor listrik yang baik. Tembaga secara luas digunakan dalam pembuatan kabel listrik dan kawat untuk peralatan listrik, dalam pembuatan koin dan peralatan rumah tangga. Tembaga tidak mudah terkorosi dibawah kondisi biasa dan tahan cuaca dengan sangat efektif (R.S. Khurmi, 2005). Karena memiliki sifat kekuatan yang baik, mampu tempa, tahan korosi, ulet, dan konduktivitas listrik yang baik, tembaga dapat dipadukan dengan logam lain untuk memperbaiki sifat mekanik, salah satunya dapat menjadi unsur paduan pada baja.

Mengacu pada mekanisme penguatan yang terjadi pada baja *high-strength low alloy* dengan penambahan sedikit unsur paduan (*microalloying*), tembaga merupakan salah satu unsur paduan yang dapat memberikan penguatan tersebut. Dengan penambahan tembaga sebagai unsur paduan pada baja dapat



berpotensi untuk mencapai keseimbangan kekuatan dan keuletan yang lebih baik daripada baja kekuatan tinggi konvensional lainnya karena adanya presipitasi Cu yang berbeda dengan presipitasi lain seperti karbida dan nitrida. Selain itu penguatan dengan penghalusan butir dapat menjadi jalan lain untuk meningkatkan kekuatan (Takaki et.al., 2004). Tembaga juga menaikkan kekerasan dengan pembentukan *solid solution* mencapai 0,66 wt.% (Evans et.al., 1990). Selain itu penambahan dengan kuantitas kecil dari tembaga ke baja karbon juga secara signifikan memperbaiki ketahanannya dalam atmosfer (Groysman, 2010).

Metode untuk menambahkan tembaga ke dalam baja dengan menggunakan metode pencelupan baja ke dalam tembaga cair atau yang disebut dengan metode *copperizing* menggunakan prinsip difusi yang mirip dengan metode *carburizing*, *nitriding*, dan metode lain yang serupa belum diteliti lebih lanjut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk dapat mengetahui perilaku tembaga meliputi kedalaman Cu, persebaran Cu, dan fase yang terbentuk setelah proses *copperizing* serta mekanisme penguatannya dengan menggunakan variasi waktu celup dan laju pendinginan.

I.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang akan dianalisis dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh waktu celup dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap perubahan mikrostruktur pada baja AISI 1006?
2. Bagaimana perilaku tembaga setelah dilakukan proses *copperizing* pada baja AISI 1006

I.3 Batasan Masalah

Agar hasil akhir yang diperoleh baik dan sesuai dengan yang diharapkan serta tidak menyimpang dari permasalahan yang ditinjau, maka batasan masalah dirasa perlu ada. Pada penelitian ini, batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:



1. Pengaruh dari lingkungan sekitar diabaikan
2. Kecepatan pengangkatan substrat dianggap konstan
3. Perubahan temperatur dari substrat saat akan dicelupkan diabaikan
4. Temperatur tembaga cair dianggap konstan

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan diadakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh waktu celup dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap perubahan mikrostruktur pada baja AISI 1006
2. Menganalisis perilaku tembaga setelah dilakukan proses *copperizing* pada baja AISI 1006

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi mengenai metode baru yang dapat digunakan untuk mendifusikan tembaga ke dalam baja karbon sangat rendah sebagai unsur paduan serta mekanisme penguatan baja melalui metode *copperizing* yang diaplikasikan pada penelitian ini.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

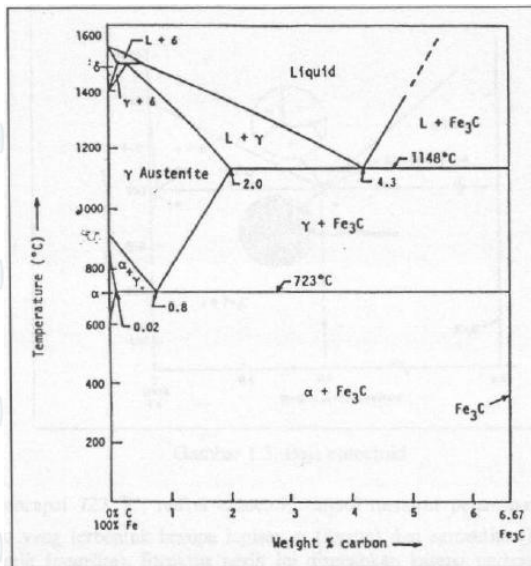
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Baja Karbon

Baja adalah paduan besi dan karbon, dengan kandungan karbon maksimal 1,5%. Karbon terjadi dalam bentuk karbida besi, karena kemampuannya untuk menaikkan kekerasan dan kekuatan pada baja. Kebanyakan baja yang dihasilkan saat ini *plain carbon steel* atau *simply carbon steel*. Baja karbon ditetapkan sebagai baja yang sifatnya secara umum bergantung pada kadar karbon dan tidak terdiri dari lebih 0,5% silikon dan 1,5% mangan. *Plain carbon steel* bervariasi dari 0,06% karbon hingga 1,5% karbon yang dibagi menjadi tipe berikut berdasarkan dengan kadar karbon (R.S. Khurmi, 2005).

1. *Dead mild steel* : mencapai 0,15% karbon
2. *Low carbon* atau *mild steel*: 0,15% - 0,45% karbon
3. *Medium carbon steel* : 0,45% - 0,8% karbon
4. *High carbon steel* : 0,8% - 1,5% karbon

Berikut ditampilkan diagram fasa Fe-Fe₃C yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Diagram fase Fe-Fe₃C

Fase-fase pada diagram fase Fe-Fe₃C adalah fase cair L, ferit-δ, autenit (γ), ferit-α, dan sementit (Fe₃C).

1.1.1 Baja AISI 1006

AISI 1006 merupakan baja yang mengandung terutama karbon sebagai unsur paduan sehingga disebut baja karbon. Mereka mengandung sekitar 0,4% silikon dan 1,2% mangan. Kromium, nikel, aluminium, tembaga, dan molibdenum juga ada dalam kuantitas yang kecil dalam baja karbon. Keistimewaan dari baja karbon AISI 1006 adalah terutama pada sifat yang lunak dan ulet. Berdasarkan ASTM A510, diketahui komposisi kimia untuk baja AISI 1006 yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut.

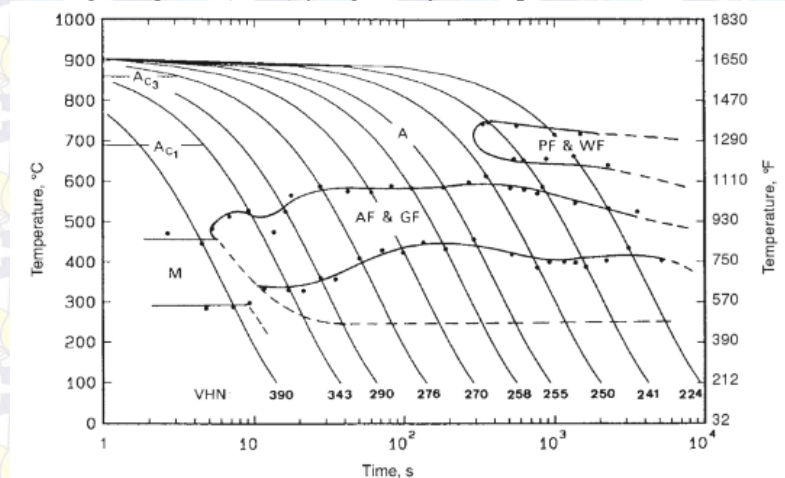


Tabel 2.1 Komposisi kimia baja AISI 1006 (ASTM A510)

Grade No.	Chemical Composition Limits, %			
	Karbon	Mangan	Fosfor, maks	Sulfur, maks
1006	0.08 maks	0.25 - 0.40	0.040	0.050

1.1.2 II.1.2 Klasifikasi Sistem Mikrostruktur Ferit Baja Karbon Rendah

Identifikasi, karakterisasi, dan klasifikasi terhadap berbagai struktur ferit didasarkan pada diagram *Continuous Cooling Diagram* (CCT) yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram CCT untuk baja HSLA yang mengandung 0.06%C, 1.45%Mn, 1.25%Cu, 0.97%Ni, 0.72%Cr, dan 0.42%Mo. PF, poligonal ferit; WF, Widmanstatten ferit; AF; acicular ferit; GF' granular ferit

1. Poligonal atan *Equiaxed* Ferit

Ini merupakan mikrostruktur ferit, sudah digambarkan sebagai proeutektoid ferit, terbentuk pada temperatur transformasi austenit yang sangat tinggi, dan laju pendinginan lambat pada baja karbon rendah. Butir atau kristal ferit membentuk inti (nukleasi) sebagai batas butir *allotriomorph* dan



tumbuh dari batas butir austenit untuk membentuk butir *equiaxed*.



Gambar 2.3 Poligonal ferit (struktur terang) dari baja HSLA-80 dengan transformasi isothermal pada 675°C. Martensit (struktur gelap) dibentuk selama pendinginan dalam austenit *untransformed* setelah ditahan isothermal. Struktur mikro, etsa nital

Bagian melewati butir ferit halus, refleksi terang, dan berwarna putih, dan butirferit sama-sama dipisahkan secara kontinyu, batas linear. Pertumbuhan polignal ferit dikontrol oleh transfer substitusi atom koheren secara parsial atau keacakan *interface* austenit-ferit dan difusi jarak panjang atom karbon yang keluar dari pertumbuhan ferit(Krauss, 2015).

2. Quasi Poligonal atau *Massive* Ferit

Pendinginan cepat pada baja karbon sangat rendah, dari temperatur dimana mikrostruktur fase tunggal austenit stabil ke temperatur dimana mikrostruktur fase tunggal ferit stabil, yang



memungkinkan temperatur transformasi austenit ke ferit tinggi tanpa perubahan komposisi. Pendinginan harus cukup cepat untuk mencegah pemisahan karbon antara austenit dan ferit ketika baja melewati daerah dua fase ferit-austenit. Butir ferit kasar dihasilkan oleh pendinginan cepat.



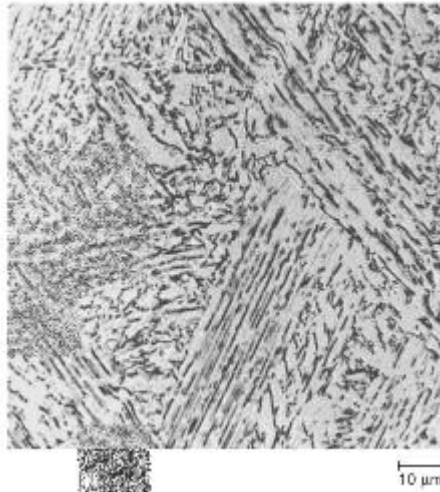
Gambar 2.4 Quasi poligonal ferit yang terbentuk dari baja *ultra-low carbon* yang mengandung 0.003%C dan 3.00%Mn didinginkan pada 50°C/s. Mikroskop optik.

Sama dengan poligonal ferit, butir *massive* adalah ferit kasar, kira-kira *equiaxed*, dan batas mereka melewati batas butir *prior-austenit*. Batas yang bergerigi pada quasi poligonal ferit, α_q , mungkin disebabkan oleh beberapa atom substitusi atau interstisi yang terpisah saat migrasi antarmuka selama transformasi. Keistimewaan *massive* ferit berhubungan dengan rendahnya rasio *yield strength-ultimate tensile strength* dan tingginya laju *strain-hardening*, serta menghasilkan kombinasi terbaik kekuatan dan keuletan pada baja karbon rendah pendinginan kontinu (Krauss, 2015).



3. Bainit atau Acicular Ferit

Pada tinggi laju pendinginan, transformasi austenit pada baja karbon rendah dan karbon sangat rendah menjadi kristal ferit yang lebih halus daripada morfologi ferit yang dijelaskan pada bagian sebelumnya. Kristal memiliki elongasi atau bentuk acicular dan ditunjukkan sebagai α_a° dalam sistem ISIJ atau sebagai acicular ferit, AF. Meskipun austenit hanya bertransformasi menjadi ferit, berdampingan dengan austenit sisa, acicular ferit, masuk dalam kelompok kristal paralel dengan austenit, juga termasuk dalam sistem klasifikasi bainit. *Range* temperatur terbentuk acicular ferit adalah secara jelas pada range temperatur *intermediate*.



Gambar 2.5 Acicular ferit yang terbentuk dengan transformasi isothermal yang mengandung tembaga pada baja HSLA-80 selama 5000s pada 500°C. Mikroskop optik, etsa nital

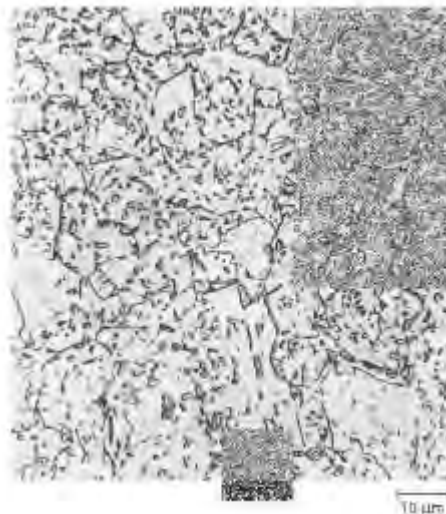
Keistimewaan yang paling menonjol yang terlihat pada mikroskop optik adalah segaris, elongasi, paralel. Struktur matriks pada Gambar 2.5 menunjukkan banyak kristal ferit yang halus, tetapi beberapa kristal memiliki orientasi kristal yang sama secara efektif dan meskipun dipisahkan oleh batas *low-angle*. Sifat



mekanik pada baja karbon rendah dengan mikrostruktur acicular ferit yang besar menunjukkan rasio *yield strength-ultimate tensile strength* rendah.

4. Granular Ferit atau Granular Bainit Ferit

Granular bainit ferit, α_B , atau granular ferit, GF, terbentuk dari temperatur transformasi *intermediate* pada baja karbon rendah. Oleh karena itu memiliki banyak kesamaan dengan bainit atau acicular ferit.



Gambar 2.6 Granular ferit yang terbentuk dari pendinginan kontinu pada baja modifikasi A710 dengan komposisi 0.33%C, 1.44%Mn, 1,20%Cu, 2.19%Ni, 0.67%Cr, dan 0.46%Mo. Mikroskop optik.

Mikrostruktur granular ferit terdiri dari austenit sisadalam matriks yang mungkin menyatakan batas butir *prior-austenit* sebagai hasil dari pengetsaan dengan nital. Bagaimanapun, berlawanan dengan acicular ferit. Partikel yang terdispersi memiliki morfologi granular atau *equiaxed*. Kristal ferit lebih halus dan berbetuk *equiaxed* (Krauss, 2015).



1.2 Baja *High Strength Low Alloy* (HSLA)

Baja high strength low alloy ditandai oleh kadar karbon dan unsur paduan rendah, yang memberikan sifat sangat baik seperti kemampuan untuk pengerjaan dingin, *profiling*, pengelasan, dan pelapisan (coating). Mekanisme penguatannya dengan *precipitation hardening* dan penghalusan ukuran butir (*grain size refinement*) yang dapat mencapai tingkat kekuatan tinggi. (European standard EN 10149.2, 1995). Baja HSLA atau baja *microalloyed* didesain untuk menyediakan sifat mekanik dan ketahanan terhadap korosi atmosfer yang lebih baik daripada baja karbon konvensional. Komposisi kimia pada baja HSLA bervariasi untuk ketebalan produk yang berbeda untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang dibutuhkan seperti kekuatan, ketangguhan, mampu dibentuk, mampu las, dan tahan korosi atmosfer. Baja HSLA pada bentuk lembaran atau *plate* memiliki kadar karbon rendah (0,05-0,25% C) untuk menghasilkan mampu dibentuk dan mampu las yang memadai, dan juga memiliki kandungan mangan mencapai 2,0%. Kuantitas yang kecil untuk kromium, nikel, molibdenum, tembaga, nitrogen, vanadium, niobium, titanium, dan zirkonium digunakan dalam kombinasi yang bervariasi.

Baja HSLA tidak mempertimbangkan paduan baja, meskipun sifat yang diinginkan diraih dengan penambahan sedikit paduan. Baja ini diklasifikasikan kedalam kategori baja yang terpisah, yang memiliki kesamaan terhadap *rolled mild-carbon steel* dengan peningkatan sifat mekanik yang dihasilkan dengan paduan dengan jumlah kecil, dan mungkin dengan proses teknik khusus seperti kontrol pengerolan dan metode pendinginan cepat. Baja HSLA dapat dibagi menjadi enam kategori berikut (ASM International, 2001).

- *Weathering steels*, terdiri dari sejumlah kecil unsur paduan seperti tembaga dan fosfor untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosfer dan penguatan solid-solution
- *Microalloyed ferrite-pearlite steels*, terdiri dari penambahan pembentuk karbida kuat atau karbon nitrida



yang sangat kecil (umumnya, kurang dari 0,10%) seperti niobium, vanadium, dan/atau titanium untuk penguatan presipitasi, penghalusan butir, dan memungkinkan transformasi temperatur kontrol

- *As-rolled pearlitic steels*, yang mungkin termasuk baja karbon-mangan tetapi juga dengan penambahan sedikit unsur paduan lain untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, mampu dibentuk, dan mampu las
- *Acicular ferrite (low-carbon bainite) steel*, yang merupakan baja karbon rendah (kurang dari 0,05% C) dengan kombinasi yang sangat baik terhadap kekuatan luluh tinggi (hingga 690 MPa atau 100 ksi), mampu las, mampu dibentuk, dan ketangguhan baik
- *Dual phase steels*, yang memiliki mikrostruktur martensit yang tersebar dalam matriks ferrit dan memberikan kombinasi yang baik pada keuletan dan kekuatan tarik yang tinggi
- *Inclusion-shape-controlled steel*, yang meningkatkan keuletan dan ketangguhan dengan penambahan sedikit kalsium, zirkonium, atau titanium

Aplikasi HSLA termasuk pipa *oil* dan gas, konstruksi dan mesin perkebunan, peralatan industri, tangki penyimpanan, komponen mobil, jembatan, struktur *off-shore*, menara *power transmission*, bangunan tiang dan panel (ASM International, 2001).

II.2.1 Mekanisme Penguatan Pada HSLA

Penguatan baja HSLA secara khusus dengan *precipitation strengthening*, *grain refinement*, dan *solid solution strengthening* dengan sedikit unsur paduan. Semua efek penguatan sensitif terhadap lingkungan proses, seperti temperatur, waktu, luas deformasi, dan laju pendinginan. Misalnya, temperatur mengontrol kelarutan dan difusi dari unsur *microalloying*, dan oleh karena itu berpengaruh besar terhadap pembentukan presipitat. Karena pertumbuhan butir adalah proses



aktivasi termal, ukuran butir dengan kuat bergantung pada temperatur dan waktu selama proses (Wei Hu, 2008).

Pilihan praktis untuk meningkatkan kekuatan baja adalah:

1. *Ferrite grain refinement*

Di awal 1950, karya yang dipublikasikan oleh Hall dan Petch menempatkan dasar untuk perkembangan modern, baja struktur *high-strength*. Persamaan Hall-Petch, yang mungkin paling terkenal dalam metalurgi *ferrous*, adalah:

$$\sigma_y = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$$

dimana σ_y = kekuatan luluh

σ_i = tegangan gesek yang melawan pergerakan dislokasi

k_y = konstanta (sering disebut *dislocation locking term*)

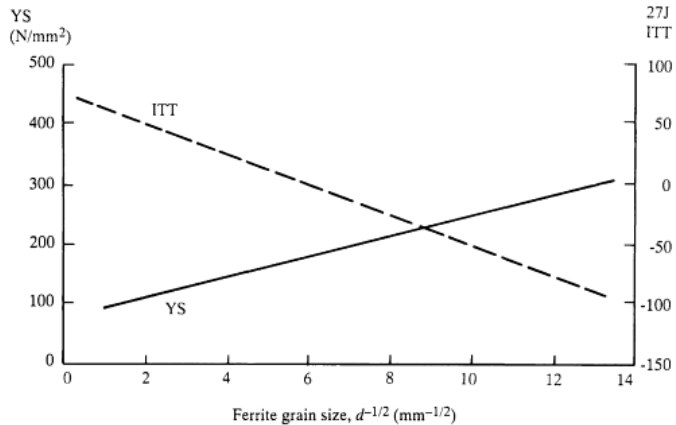
d = ukuran butir ferit

Dengan penghalusan ukuran butir ferit akan menaikkan kekuatan luluh dan hubungannya ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Mengingat efek penguatan biasanya menurunkan ketangguhan, itu menunjukkan bahwa penghalusan ukuran butir ferit juga menghasilkan perbaikan ketangguhan secara bersamaan. Persamaan Petch terkait ketangguhan dengan ukuran butir diberikan di bawah:

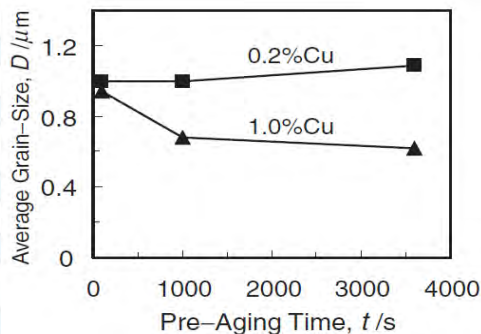
$$\beta T = \ln \beta - \ln C - \ln d^{-1/2}$$

dimana β dan C konstanta, T adalah temperatur transisi ulet-getas, dan d adalah ukuran butir ferit. Oleh karena itu, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.7, dampak temperatur transisi menurun meskipun ukuran butir ferit berkurang (D.T Llewellyn, 1992).



Gambar 2.7 Pengaruh ukuran butir ferit terhadap kekuatan luluh dan sifat impact (D.T Llewellyn, 1992)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Takaki et al. (2004) menunjukkan terjadi penurunan ukuran butir dengan naiknya kadar tembaga yang ditampilkan pada Gambar 2.8 berikut.



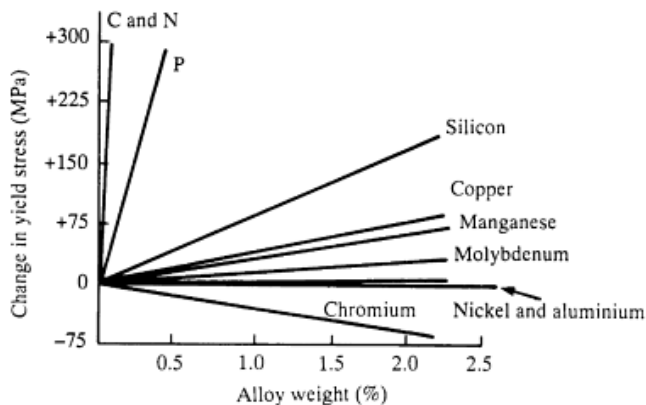
Gambar 2.8 Perubahan ukuran butir dengan *pre-aging time* (Takaki et. al., 2004)

Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran butir bergantung pada kadar tembaga dan waktu *pre-aging*.



2. Solid Solution Strengthening

Efek *solid solution strengthening* dengan unsur paduan biasa diilustrasikan pada Gambar 2.9, serta karya Pickering dan Gladman memberikan koefisien penguatan yang ditunjukkan pada Tabel 2.2 untuk baja ferit-perlit yang mengandung hingga 0,25% C dan 1,5%. Data tersebut mengilustrasikan sangat kuat efek penguatan pada unsur interstisial, karbon dan nitrogen, tetapi harus diingat bahwa unsur tersebut memiliki kelarutan yang terbatas dalam ferit. Bagaimanapun, karbon dan nitrogen juga memiliki efek ketangguhan yang berlawanan. Dengan unsur substitusi, fosfor adalah yang paling berpotensi (D.T Llewellyn, 1992).



Gambar 2.9 Efek penguatan solid solution dalam ferit-perlit baja high-strength low-alloy (D.T Llewellyn, 1992)



Tabel 2.2 Koefisien penguatan untuk baja ferit-perlit (D.T Llewellyn, 1992)

Element	N/mm ² per 1 Wt %
C dan N	5544
P	678
Si	83
Cu	39
Mn	32
Mo	11
Ni	~0
Cr	-31

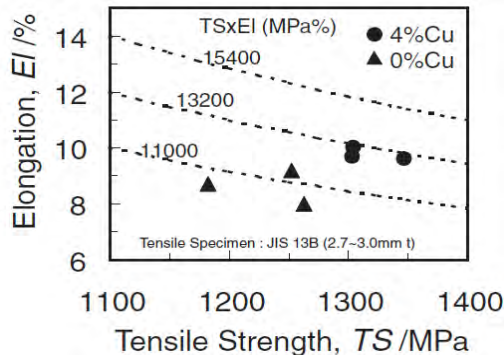
Seperti halnya karbon dan nitrogen, fosfor memiliki efek yang merusak ketangguhan dan oleh karena itu tidak digunakan sebagai agen penguatan *per se* dalam baja struktur. Di sisi lain, fosfor ditambahkan sehingga disebut *weathering steel* karena efek yang menguntungkan pada ketahanan korosi atmosfer. Pada unsur yang lain, hanya silikon dan mangan yang hemat biaya sebagai penguat *solid solution* tapi silikon ditambahkan ke baja terutama sebagai agen deoksidasi (D.T Llewellyn, 1992).

3. *Precipitation strengthening*

Penguatan presipitasi dapat dipengaruhi oleh berbagai unsur, tetapi, dalam konteks baja ferit-perlit, sistem tersebut terlihat signifikan dengan melibatkan niobium, vanadium, dan titanium. Unsur tersebut memiliki afinitas yang kuat untuk karbon dan nitrogen dan, konsekuensinya, karbon dan nitrogen hanya memiliki kelarutan yang terbatas dalam baja. Oleh karena itu mereka ditambahkan ke baja dalam jumlah kecil yakni mencapai 0,06% Nb atau 0,15% V, dan sebagai bagian awal yang sering ditunjuk sebagai unsur *micro-alloying* (D.T Llewellyn, 1992).



Hasil penelitian Takaki et. a. (2004) yang menunjukkan pengaruh presipitasi Cu ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Keseimbangan TS-Elongation pada baja tanpa Cu dan 4%Cu (Takaki et. al., 2004)

Presipitasi Cu berperan utama dalam penguatan dengan *aging*. Ini didukung oleh fakta bahwa TS x El yang diperoleh dari penambahan Cu lebih tinggi daripada baja tanpa Cu. (Takaki et al., 2004)

1.3 Tembaga

Tembaga adalah logam yang dirancang minimal kandungan tembaga 99,3% atau lebih tinggi. *Dilute* atau paduan tembaga tinggi (~94% Cu min) terdiri dari jumlah kecil berbagai unsur paduan seperti berilium, cadmium, atau kromium, masing-masing memiliki kelarutan kurang dari 8%. Karena paduan tembaga tinggi menahan struktur *face-centered cubic* α pada tembaga, sifat fisisnya sama dengan sifat pada logam murni yang ditunjukkan pada Tabel 2.3. Pemaduan umumnya memberikan kekuatan yang lebih tinggi, kestabilan termal (tahan terhadap pelunakan), atau sifat mekanik lain ketika menahan konduktivitas listrik yang cukup untuk digunakan. Istilah "modifikasi tembaga" juga telah digunakan untuk menggambarkan logam yang memiliki kandungan tembaga yang



ditetapkan kurang dari 99,88% tetapi tidak kurang dari 99,3% (Davis J.R., 2001).

Dengan nomer atom 29, tembaga termasuk golongan IB dalam tabel periodik unsur. Logam mulia lain yang berada pada golongan ini adalah perak dan emas, yang menunjukkan bahwa tembaga memiliki sifat-sifat seperti keuletan yang tinggi dan kestabilan kimia (Kundig ほか, 2006).

Tabel 2.3 Sifat-sifat dari tembaga murni (Kundig, et.al., 2006)

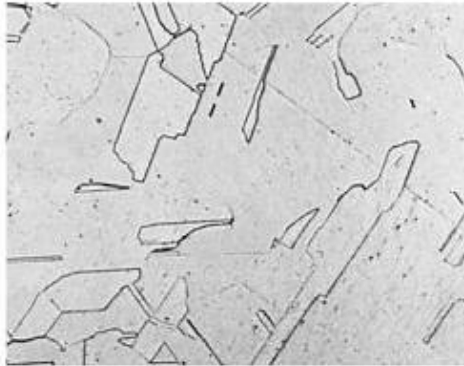
Property	Value
Atomic weight	63.546
Atomic volume, cm^3/mol	7.11
Mass numbers, stable isotopes	63 (69.1%), 65 (30.9%)
Oxidation states	1, 2, 3
Standard electrode potential, V	$\text{Cu}/\text{Cu}^+ = 0.520$ $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+} = 0.337$ 0.3294 for Cu^{2+} 0.6588 for Cu^+
Electrochemical equivalent, mg/C^{150}	0.158 ($\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$) 0.3402 ($\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$) 0.522 ($\text{Cu}^+ + e^- \rightarrow \text{Cu}$)
Electrolytic solution potential, V (SCE) ⁽¹⁵⁾	8.95285 (pure, single crystal) 8.94 (nominal)
Density, g/m^3	0.1276 (12-fold coordination)
Metallic (Goldschmidt) radius, nm	0.096
Ionic radius, M^+ , $\text{nm}^{(2)}$	0.138
Covalent radius, $\text{nm}^{(2)}$	fcc, Al, Fm3m: cF4
Crystal structure	0.361509 \pm 0.000004 nm (25°C, 77 °F)
Lattice parameter	2.43
Electronegativity ⁽³⁾	First 745 Second 1950
Ionization energy, $\text{kJ}/\text{mol}^{(3)}$	7.724 Cu(I) 20.29 Cu(II) 36.83 Cu(III)
Hall effect ⁽¹⁵⁾	Hall voltage, V at 0.30–0.8116 T Hall coefficient, $\text{mV} \cdot \text{mA} \cdot \text{T}$
Heat of atomization, $\text{kJ}/\text{mol}^{(3)}$	–5.24 $\times 10^{-4}$ –5.5
Thermal conductivity, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	339
Electrical conductivity, MS/cm at 20°C	394, ⁽²⁾ 398 ⁽¹⁵⁾
Electrical resistivity at 20°C, $\text{n}\Omega \cdot \text{m}$	0.591
Temperature coefficient of electrical resistivity, 0–100°C ⁽¹⁵⁾	16.70
Melting point	0.0068 1358.03 K (1084.88 °C, 1984.79 °F) ⁽¹⁵⁾ 1356 K (1083°C, 1981.4 °F) ⁽²⁾
Heat of fusion, kJ/kg	205, 204.9, 206.8 ⁽¹⁵⁾ 212 ⁽²⁾
Boiling point	2868 K (2595 °C, 4703 °F), 2840 K (2567°C, 4652 °F) ⁽¹⁵⁾ 2595 K (2868°C, 5194 °F) ⁽¹⁵⁾
Heat of vaporization, kJ/kg	7369 ⁽²⁾ 4729, 4726, 4793 ⁽¹⁵⁾
Specific heat, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$	0.255 (100 K) ⁽¹⁵⁾ 0.384 (293 K) ⁽²⁾ 0.386 (293 K) ⁽¹⁵⁾ 0.494 (2000 K) ⁽¹⁵⁾
Coefficient of expansion, linear, $\mu\text{m}/\text{m}$	16.5
Coefficient of expansion, volumetric, $10^{-6}/\text{K}$	49.5
Tensile strength, MPa	230 (annealed) ⁽²⁾ 209 (annealed) ⁽¹⁵⁾ 344 (cold drawn) ⁽¹⁵⁾



Lanjutan Tabel 2.3

Property	Value
Elastic modulus, GPa	125 (tension, annealed) ⁽¹⁵⁾ 102–120 (tension, hard drawn) ⁽²⁾ 128 (tension, cold drawn) ⁽¹⁵⁾ 46.4 (shear, annealed) ⁽¹⁵⁾ 140 (bulk) ⁽¹⁵⁾
Magnetic susceptibility, 291 K, mks	-0.086×10^{-6} (°) -1.08×10^{-6} (°)
Emissivity	0.03 (unoxidized metal, 100°C) ⁽²⁾ 0.8 (heavily oxidized surface) ⁽¹⁵⁾
Spectral reflection coefficient, incandescent light	0.63 ⁽¹⁵⁾
Nominal spectral emittance, $\lambda = 655$ nm, 800°C	0.15 ⁽¹⁵⁾
Absorptivity, solar radiation	0.25 ⁽¹⁵⁾
Viscosity, mPa·s (cP)	3.36 (1085°C, 1985 °F) ⁽¹⁵⁾ 3.33 (1100°C, 2012 °F) ⁽¹⁵⁾ 3.41 (1145°C, 2093 °F) ⁽²⁾ 3.22 (1150°C, 2102 °F) ⁽¹⁵⁾ 3.12 (1200°C, 2192 °F) ⁽¹⁵⁾
Surface tension, m·N/m (dyn/cm)	1300 (99.99999% Cu, 1084°C, 1983 °F, vacuum) ⁽¹⁵⁾ 1341 (99.999% Cu, N ₂ , 1150°C, 2102 °F) ⁽¹⁵⁾ 1104 (1145°C, 2093 °F) ⁽²⁾ (see Ref. 15 for additional data)
Coefficient of friction	4.0 (Cu on Cu) in H ₂ or N ₂ (°) 1.6 (Cu on Cu) in air or O ₂ (°) 1.4 (clean) ⁽¹⁵⁾ 0.8 (in paraffin oil) ⁽¹⁵⁾
Velocity of sound, m/s	4759 (longitudinal bulk waves) ⁽¹⁵⁾ 3813 (irrotational rod waves) ⁽¹⁵⁾ 2325 (shear waves) ⁽¹⁵⁾ 2171 (Rayleigh waves) ⁽¹⁵⁾

Spesimen tembaga dan paduan tembaga untuk pengujian mikroskopik di ekstrak dari massa yang lebih besar dengan *sawing*, *shearing*, *filing*, *hollow boring*, atau alat potong *abrasive-wheel*. Struktur mikro tembaga ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut (Davis J.R., 2001).

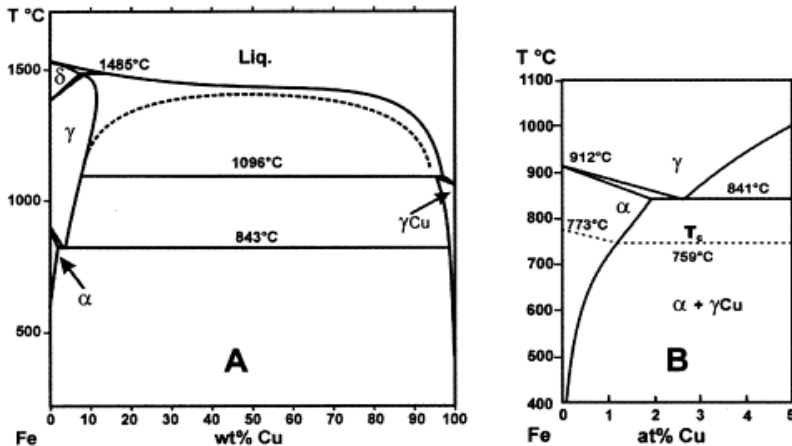


Gambar 2.11 Struktur mikro tembaga C10200, *hot-rolled bar*

II.3.1 Sistem Fe-Cu

Sistem biner terbatas: Fe-Cu

Hanya fase di dalam sistem Fe-Cu yang merupakan terminal larutan padat δ -Fe, α -Fe, γ -Fe dan γ -Cu. Diagram yang lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.12 yang merupakan hasil dari data *optimisation* dan perhitungan menggunakan Thermocalc baru-baru ini. Dibawah kondisi ekuilibrium, liquid adalah fase tunggal, tetapi beberapa penulis melaporkan cenderung untuk membentuk *metastable miscibility gap*. Tentu saja, ini dapat diprediksi dengan perhitungan dan ditunjukkan oleh garis titik-titik dalam Gambar 2.12-A. Representasi yang lebih detail pada sisi yang kaya Fe dalam Gambar 2.12-B yang juga ditentukan oleh data *optimisation*, diikuti dengan perhitungan dasar CVM. Kelarutan tembaga dalam besi sangat kecil pada temperatur rendah (Madeleine Durand, 2003).



Gambar 2.12: Sistem Fe-Cu. (A) Perhitungan diagram fase lengkap. Garis titik-titik merepresentasikan liquidus untuk *metastable miscibility gap*. (B) Detail sisi yang kaya Fe, berdasarkan pada perhitungan CVM. Perhatikan ada sedikit perbedaan temperatur eutektoid dibandingkan dengan (A). Komposisi diungkapkan dalam % atom untuk memfasilitasi perbandingan dengan perhitungan diagram Fe-Cu (Madeleine Durand, 2003).

Tembaga dan besi terlarut sempurna dalam kondisi lebur. Ketika sedikitnya 0,1 wt.% karbon terdapat dalam besi, kemampuan larut sempurna tidak terjadi. Selama solidifikasi, sekitar 10 wt.% tembaga akan ditahan dalam *solid solution* substitusi dengan besi delta dan gamma. Bagaimanapun, selama transformasi menjadi besi alfa, kemampuan untuk larut menurun (hanya untuk 2 atau 3 wt.%), dengan demikian selama pendinginan lambat ke temperatur kamar mendekati kondisi ekuilibrium, sebanyak kurang dari 1 wt.% tembaga akan ditahan dalam *solution*. Tembaga adalah pembentuk austenit yang kuat. Penguatan ferit dengan tembaga kurang daripada unsur paduan konvensional lainnya. Penambahan tembaga ke baja adalah terutama untuk pengerasan presipitasi (Avazkonandeh, 2009).



II.3.2 Pengaruh Cu Terhadap Baja

Tembaga pada level melebihi 0,50% meningkatkan kekuatan pada baja karbon rendah dan baja karbon medium dengan sifat dari penguatan ferit, yang diikuti dengan hanya sedikit penurunan keuletan. Tembaga dapat ditahan tetap dalam keadaan *solid solution* dengan pendinginan lambat yang dihasilkan ketika bagian yang besar dinormalisasi, tapi itu akan terpresipitasi keluar ketika baja dipanaskan kembali sekitar 510⁰C hingga 605⁰C (950 hingga 1125⁰F). Pada sekitar 1% tembaga, kekuatan luluh meningkat sekitar 70 hingga 140 MPa tanpa efek unsur paduan lainnya. Tembaga dengan jumlah hingga 0,75% dianggap hanya memberi efek yang kurang baik pada ketangguhan takik atau kemampuan dilas. Pengerasan presipitasi tembaga memberikan baja kemampuan untuk dibentuk secara ekstensif dan kemudian presipitasi mengeras sebagai bentuk kompleks atau perakitan lasan (Total Materia, 2006). Cu dapat berkontribusi terhadap penguatan *solid solution* pada baja. Penguatan ini berada pada level sekitar 12 MPa dengan penambahan 0,5% Cu. Selain penguatan *solid solution*, Cu dapat juga menaikkan kekerasan pada baja. Meskipun Cu merupakan penstabil austenit, Cu dapat menurunkan temperatur transformasi austenit ferit, sehingga dapat menghaluskan ukuran ferit dalam struktur (Satyendra, 2014).

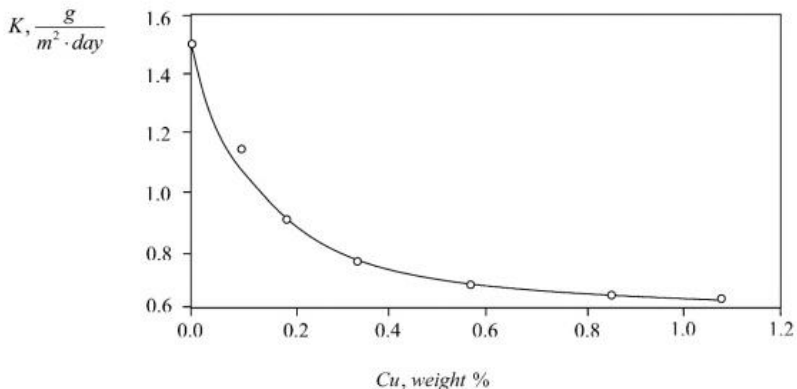
Evans et.al (1990) telah mempelajari efek tembaga dengan kadar 0,04-1,4 wt.% pada baja lasan C-Mn *metal deposits*. Dia menemukan bahwa tembaga menaikkan kekerasan dengan pembentukan *solid solution* mencapai 0,66 wt.% dan melebihi dari jumlah ini juga akan memberikan pengerasan presipitasi mencapai 1,4 wt.%. Dengan meningkatnya kadar tembaga, akan menurunkan kandungan *acicular ferrite* (AF) dan menaikkan ferit dengan fase *second aligned* (FS(A)). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa 0,66 wt.% tembaga ialah jumlah yang tepat.

Dalam penelitian oleh Moline (2002) menunjukkan bahwa tembaga membuktikan perannya sebagai penguatan *solid solution* mencapai maksimal 0,5 wt. pct. tembaga dan sebagai



penguatan presipitasi setelah itu. Penambahan tembaga yang paling optimal pada elektroda 14018 *shielded metal arc-welding* adalah mencapai maksimal 0.75 wt. pct. tembaga yang menghasilkan kekuatan luluh 138 ksi. Hasil ini sesuai dengan investigasi peneliti sebelumnya bahwa penambahan tembaga pada baja HSLA efek yang kuat pada kekuatan dan perubahan mikrostruktur. Di sisi lain, ketangguhan meningkat, mencapai maksimal 0,25 wt. pct. penambahan tembaga dan kemudian menurun dengan pelan dengan naiknya tembaga. Pada ASM *International* (2001) mengenai baja *High Strength Low Alloy Steel* menunjukkan bahwa kadar Cu untuk berbagai tipe baja HSLA berkisar antara minimal 0.20% hingga 1.00%Cu.

Penambahan 0,4 wt.% tembaga ke baja karbon mengurangi dua kali dari laju korosinya dalam atmosfer (Gambar 2.13). Ini adalah salah satu metode untuk menaikkan ketahanan baja karbon dalam atmosfer. Penambahan dengan kuantitas kecil dari tembaga, fosfor, kromium, dan nikel (total maksimum beberapa persen) ke baja karbon juga secara signifikan memperbaiki ketahanannya dalam atmosfer. Baja ini disebut dengan *weathering steels* (Groysman, 2010).



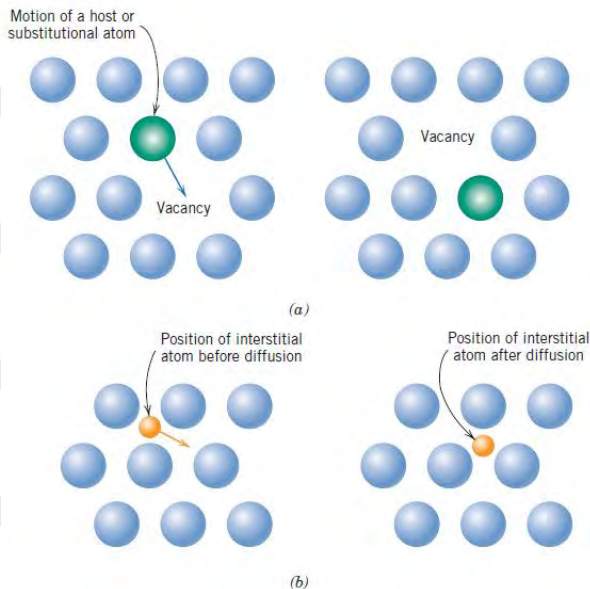
Gambar 2.13 Efek kandungan tembaga pada baja karbon terhadap korosinya dalam atmosfer (4 tahun), (Groysman, 2010)



1.4 Difusi

Mekanisme Difusi

Difusi *solid state* diartikan sebagai transfer massa dalam material *solid* dengan pergerakan atom. Istilah "*self diffusion*" mengacu pada istilah migrasi atomnya sendiri. Untuk atom pengotor, istilah "*interdiffusion*" yang digunakan. Dua mekanisme yang mungkin adalah *vacancy* dan *interstitial* seperti pada Gambar 2.14 di bawah.



Gambar 2.14 Skematik yang menunjukkan (a) *vacancy diffusion*, dan (b) *interstitial diffusion* (Callister, 2007)

Untuk atom agar dapat bergerak, dua syarat yang harus dipenuhi adalah: (1) ada tempat kosong yang memungkinkan, dan (2) atom harus memiliki cukup energi untuk memutus ikatan dengan atom tetangganya dan kemudian menyebabkan beberapa distorsi *lattice* selama perpindahan (Callister, 2007).

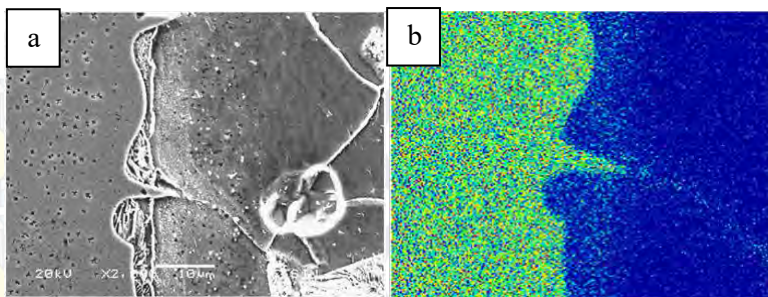


II.4.1 Difusi Cu-Fe

Difusi tembaga dalam 99% besi murni di atas temperatur Curie telah diinvestigasi oleh Lindner dan Karnik. Lebih lanjut lagi, diketahui bahwa penambahan sedikit mangan atau kromium menurunkan laju difusi dalam besi. Oleh karena itu investigasi lebih disarankan untuk difusi tembaga dalam besi murni (99,995%) dalam fase paramagnetik dan ferromagnetik (Anand, M. S., 1966). Difusi besi dalam tembaga cair telah diukur pada *range* temperatur 1100-1300⁰C. Hasil penelitian dari Gaussian mengindikasikan bahwa difusi batas butir dari tembaga yang utama terjadi pada temperatur $\leq 815^0\text{C}$ dalam fase α . Dalam fase γ , difusi batas butir yang utama terjadi pada temperatur $\leq 1250^0\text{C}$. Sebagai tambahan, berdasarkan *autoradiograph* dari spesimen besi murni rendah mengindikasikan adanya aglomerasi dari Cu dekat dengan batas butir, peneliti berspekulasi bahwa Cu terperangkap oleh proses inklusi atau presipitasi yang berhubungan dengan pengotor yang ada dalam *solution* (Butrymowicz, Daniel B., 1976).

II.4.2 Perilaku Difusi Tembaga dalam Baja

Tembaga cair dapat didifusikan ke dalam substrat padat baja, seperti halnya sebagian tembaga cair yang berdifusi pada proses *furnace brazing*, yaitu ke dalam permukaan substrat baja tanpa *pre-heat* sebelumnya (Molleda, 2008). Dari penelitian yang dilakukan Molleda (2008) tersebut, dapat dilihat pada Gambar 2.15 penetrasi tembaga pada permukaan.



Gambar 2.15 Hasil pengamatan (a) mikrostruktur dan (b) SEM-EDX dari permukaan yang telah melalui proses *copper brazing*

Disebutkan dalam penelitian Molleda (2008), dari Gambar 2.15 diatas terlihat bahwa adanya difusi tembaga (hijau) di batas butir yang terlihat jelas pada saat dilakukannya *mapping* tembaga dengan EDX pada gambar (b) dan butir terlihat lebih jelas pada gambar (a), terlihat juga sebagian tembaga berada dalam butir dari struktur penyusun baja dengan jumlah lebih banyak di bagian permukaan.

Hal ini sesuai juga dengan yang dilakukan oleh Yourong Xu (1993) yang penelitiannya dikhususkan ke perilaku difusi pada metode tersebut. Disebutkan bahwa tembaga cair mampu berdifusi ke dalam baja dengan 3 mekanisme, yaitu (1) tembaga berdifusi ke dalam baja di sepanjang batas butir *ferrite*, (2) tembaga berdifusi ke dalam butir *ferrite*, dan (3) Fe yang berdifusi ke dalam lapisan tembaga. Selain itu, kemampuan difusi tembaga melalui proses ini hingga kedalaman 10 - 20 μm . Namun dalam hal ini bentuk difusi dari Cu di dalam substrat dan dalam struktur dari baja beragam tergantung dari kedalaman penetrasinya dan daerah yang terpenetrasi. Jumlah Cu yang mampu berdifusi pada batas butir lebih banyak pada daerah *triple grain boundary* dibanding daerah batas butir yang lebih sempit. Selain itu, juga terjadi difusi ke dalam butir ferit dengan jumlah yang bervariasi dengan parameter tertentu.

Perilaku difusi berdasar gradien sepanjang batas butir ferit bisa dituliskan sebagai berikut: (1) Konsentrasi Cu pada

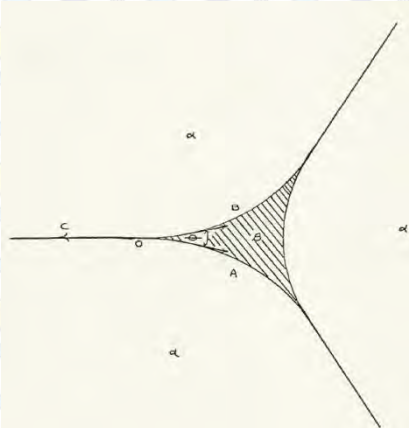


batas butir yang lebar tidak sama seperti yang berada pada batas butir yang sempit, adanya jarak difusi yang lebih besar dan konsentrasi yang lebih tinggi di batas butir lebar, serta laju penurunan konsentrasi Cu yang lebih rendah saat penetrasi ke dalam batas butir lebar; (2) Konsentrasi Cu dekat permukaan (umumnya 6,5-8%), yang turun seiring dengan bertambahnya jarak difusi, lebih rendah dari kelarutan Cu dalam $\alpha\text{-Fe}(\text{Cu})$ pada saat temperatur 1100-1200°C. Penurunan konsentrasi makin jelas ketika kedalaman difusi 10-15 μm . Penurunan konsentrasi mencapai 0,14% (dibawah 1%) pada kedalaman 10 μm dengan ukuran butir lebih kecil dan batas butir yang lebih sempit. Hal ini membuktikan bahwa ukuran butir menjadi sangat kecil dan membentuk struktur jaringan padat untuk membentuk daerah ikatan Cu yang sangat kuat dan sangat kokoh tanpa merusak keuletannya (Xu, 1993).

Untuk difusi Cu cair ini dibuktikan dan diilustrasikan juga dalam penelitian oleh Savage (1978) yang menyebutkan bahwa: penetrasi Cu ke dalam batas butir dipengaruhi dari kemampuan logam cair untuk membasahi logam pada kondisi solid atau biasa disebut *wetting*. Istilah *wetting* sendiri dapat didefinisikan sebagai fenomena yang menyangkut fase solid dan likuid sebegitu rekatnya hingga kekuatan adhesi diantara kedua fase tersebut lebih besar dari kohesi dari likuid itu sendiri. Selain itu disebutkan juga bahwa penetrasi Cu ke dalam batas butir tidak langsung terjadi pada baja karbon rendah karena harus menunggu difusi C ke dalam batas butir terlebih dahulu dan tidak ada hambatan bagi Cu untuk penetrasi ke dalam baja eutektoid sehingga Cu langsung dapat melakukan penetrasi ke dalam batas butir. Kemampuan penetrasi ini juga dipengaruhi oleh bagaimana unsur-unsur yang berada dalam baja mempengaruhi kemampuan C untuk mencari batas butir yang kaya Cu. Jika dikaitkan dengan nilai energi aktivasi dari penetrasinya maka semakin tinggi kadar C dalam baja maka energi aktivasinya akan semakin rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa temperatur dari Cu cair dan waktu Cu itu tetap dalam kondisi cair sangat menentukan terhadap kedalaman penetrasi.



Ilustrasi dari Cu yang berada pada batas butir dapat dilihat pada Gambar 2.16 dibawah ini. Gambar tersebut menunjukkan adanya penyesuaian dari butir untuk menurunkan energi permukaan dari system diatas temperatur leleh dari Cu. Energi permukaan yang dimaksud adalah energi permukaan dari batas butir. Merapatnya batas butir disebabkan penyesuaian ini.



Gambar 2.16 Skema lokasi dari Cu pada pertemuan 3 batas butir dari struktur penyusun utama ferrite - α

1.5 Laju Pendinginan

Proses perlakuan panas diawali dengan pemanasan material dan kemudian mendinginkannya pada *brine*, air, dan oli. Tujuan dari perlakuan panas adalah untuk melunakkan material, merubah ukuran butir, untuk memodifikasi struktur material dan untuk melepaskan tegangan pada material setelah pengerjaan panas dan dingin. Variasi dari proses perlakuan panas yang biasanya digunakan sebagai berikut (Sanjib Kumar Jaypuria, 2008):

1. Annealing

Anil adalah nama umum dari proses laku panas yang dilakukan dengan memanaskan baja sampai temperatur tertentu, lalu mendinginkannya secara perlahan. Anil dapat



bertujuan untuk menghaluskan butiran, atau melunakkan atau memperbaiki *machinability*. Juga dapat memperbaiki sifat kelistrikan, dan kemagnitan. Seringkali juga anil dimaksudkan untuk menghilangkan tegangan sisa dan memperbaiki keuletan (Wahid Suherman, 2001).

2. Normalizing

Proses ini memberikan struktur homogen yang terdiri dari ferit dan perlit untuk baja hipoeutektoid, dan perlit dan sementit untuk baja hipereutektoid. Struktur yang homogen memberikan titik luluh, *ultimate tensile strength*, dan kekuatan impak yang lebih tinggi dengan keuletan yang lebih rendah pada baja. Proses *normalizing* biasanya diaplikasikan untuk *casting* dan *forging*, dan sebagainya. Baja paduan juga mungkin dinormalisasi tetapi mereka seharusnya ditahan hingga dua jam pada temperatur tertentu dan kemudian didinginkan di dalam *furnace* (R.S. Khurmi, 2005).

3. Quenching

Quenching merupakan cara pendinginan untuk pengerasan baja yang mula-mula sekali dikenal, dilakukan dengan mencelupkan benda kerja ke dalam suatu media pendingin (*quenching*), dari temperatur pengerasan langsung sampai ke temperatur kamar. Media pendinginan yang dipergunakan biasanya air, minyak.

Pengerasan biasanya dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi, dan/atau kekuatan dan *fatigue limit*/kekuatan yang lebih baik. Pengerasan ini dilakukan dengan memanaskan baja ke daerah austenit, lalu mendinginkannya dengan cepat. Dengan pendinginan cepat ini terbentuk fase martensit yang keras, dimana kristal bertransformasi dari FCC menjadi BCT. Temperatur pemanasannya (temperatur austenisasi), lamanya waktu tahan, dan laju pendinginan untuk pengerasan ini banyak



tergantung pada komposisi kimia dari baja (Wahid Suherman, 2001).

1.6 II.6 Penelitian Sebelumnya

1.6.1 II.6.1 Efek Cu Terhadap Struktur Mikro

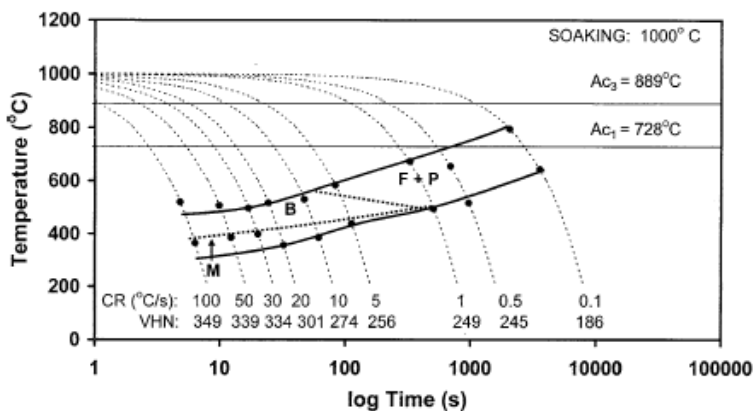
S. K. Ghosh, dkk tahun 2009 melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan tembaga terhadap struktur mikro dan sifat mekanik dengan proses termomekanik pada baja *microalloyed*. Material yang digunakan adalah baja Ti-B. Metodenya adalah dengan meleburkan paduan menggunakan *induction-melting furnace* kemudian di tempa menjadi batang pada temperatur 1200°C dan dihot-rolled hingga ketebalan maksimal 6 mm.

Dari hasil pengujian OES menunjukkan komposisi kimia spesimen uji pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Komposisi kimia baja yang diinvestigasi (wt%)

Steel identification	C	Mn	Si	S	P	Ti	B	Cu	Ni	N
Ti-B	0.04	1.60	0.49	0.021	0.013	0.028	0.0009	-	-	0.0056
1.5 Cu-Ti-B	0.04	1.69	0.57	0.021	0.013	0.032	0.0013	1.54	-	0.0080
1.5 Cu-Ti-B-Ni	0.04	1.68	0.53	0.020	0.013	0.032	0.0012	1.55	0.79	0.0058

Pada Gambar 2.17 menunjukkan diagram CCT untuk baja *microalloyed* Ti-B yang ditambahkan 1,5% Cu.

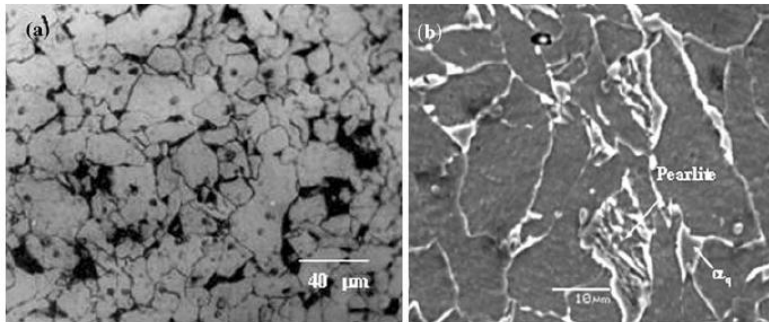




Gambar 2.17 Diagram CCT untuk 1.5 wt% Cu yang terkandung pada baja *microalloyed*

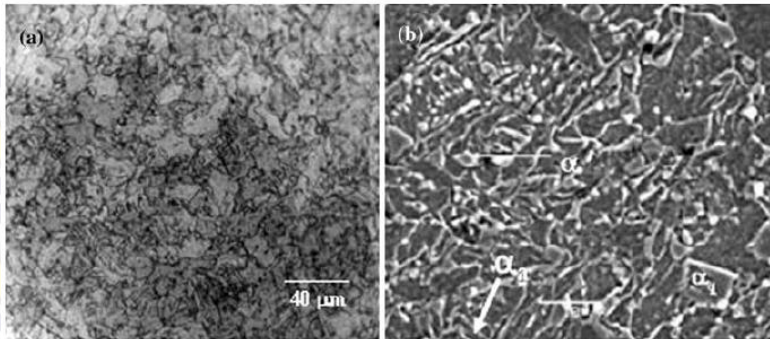
Pada Gambar 2.17 menunjukkan penambahan 1,5 wt% Cu dalam baja Ti-B yang menurunkan temperatur transformasi austenit dibawah 600°C untuk laju pendinginan serendah 5°C/s . Baja yang didinginkan pada 5°C/s terdiri dari fase ferit tanpa ada jumlah perlit yang terlihat. Pada laju pendinginan yang lebih tinggi, sebagian besar mikrostrukturnya berupa fase martensit dan/atau bainit. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penambahan 1,5 wt%Cu pada baja Ti-B cukup efektif menurunkan temperatur awal austenit dan menghambat pembentukan perlit dibawah laju pendinginan yang sebanding dengan pendinginan udara.

Perubahan mikrostruktur pada baja dengan pendinginan udara langsung ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 (a)Gambar hasil optik sampel Ti-B *Microalloyed* yang menunjukkan daerah perlit gelap, (b)Gambar hasil SEM pada sampel sama yang menunjukkan fase perlit pengaruh etsa

Gambar 2.18(a) menunjukkan mikrostruktur optik dan SEM dari sampel Ti-B *microalloyed* setelah *hot rolling* diikuti pendinginan udara. Mikrostruktur optik yang ditunjukkan pada Gambar 2.18(a) menyatakan morfologi campuran butir ferit dengan distribusi fase gelap pada batas butir ferit dan daerah pertemuan tiga titik butir.



Gambar 2.19 (a)Gambar optik sampel baja 1.5 Cu-Ti-B yang menunjukkan mikrostruktur ferit halus dengan distribusi *dark islands*, (b)Gambar SEM menunjukkan distribusi martensit (α') dan *quasi-polygonal ferrite* (α_q) dan acicular ferit (α_a).

Gambar optik yang ditunjukkan Gambar 2.19(a) menyatakan bahwa fase batas butir pada sampel *microalloy* yang mengandung 1.5 wt%Cu adalah pada dasarnya non-perlit alami. Pada hasil SEM (Gambar 2.11(b)) menyatakan bahwa morfologi produk dekomposisi austenit adalah pulau lain atau acicular alami. Keberadaan fasa ferit sesekali dengan batas yang tidak beraturan juga terbukti. Seperti fasa ferit terbentuk selama transformasi fase tunggal austenit menjadi fase tunggal ferit dengan pendinginan cepat pada *low carbon steel* dan telah ditetapkan sebagai *quasi-polygonal ferrite* oleh ISIJ Bainite Committee.

Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh A. M. Elwazri, dkk (2008) yang menganalisis efek tembaga terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik pada baja *microalloyed* menjelaskan bahwa penambahan tembaga meningkatkan kekuatan yang dijelaskan oleh efek tembaga dalam penguatan *solid solution*. Mikrostruktur dan sifat mekanik dibawah kondisi *cool deformation* di investigasi untuk tiga baja yang mencapai 0.03% karbon dengan penambahan paduan berbeda dari niobium



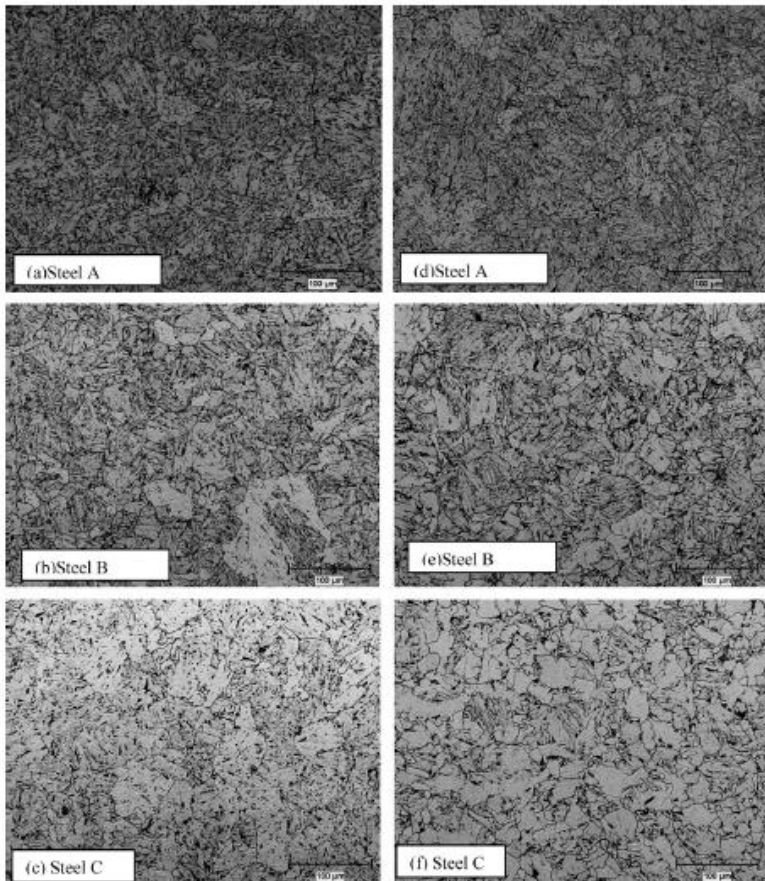
dan tembaga. Komposisi material yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia baja (wt%)

	C	Mn	Si	Cu	Nb	Ti	Mo	N	Others
A	0.038	1.8	0.28	0.42	0.09	0.02		0.0092	Ni, Mo
B	0.049	1.6	0.08	0.4	0.07	0.02	0.3	0.009	
C	0.039	1.6	0.08		0.07	0.02	0.3	0.009	

Baja A dimanufaktur komersial oleh IPSCO Inc., dan 2 baja yang lain disiapkan, di tuang, dan *dirolled* di CANMET Materials Technology Laboratory in Ottawa, Canada. Baja A mengandung unsur sisa dari daur ulang baja dengan kandungan Cu yang tinggi.

Metode penelitian yang digunakan adalah setelah memanaskan kembali pada temperatur 1200°C dalam *radiant furnace mounted*, spesimen didinginkan paada 1°C s^{-1} sampai pada temperatur uji (400°C) ditahan selama 5 menit untuk homogenisasi. Spesimen kemudian dideformasi dengan ditekan pada tegangan antara 0.06 dan 0.2 pada laju tengangan konstan (1s^{-1}) dan ditahan di temperatur ini dari 10 menit hingga 180 menit. Ini diikuti dengan pendinginan udara sampai temperatur kamar. Spesimen yang terpilih dipanaskan sebelumnya, dan kemudian *diaging* pada 400°C untuk wantu berkisar dari 10 hingga 180 menit diikuti pendinginan udara. Hasil mikroskop optik ditunjukkan pada Gambar 2.20.



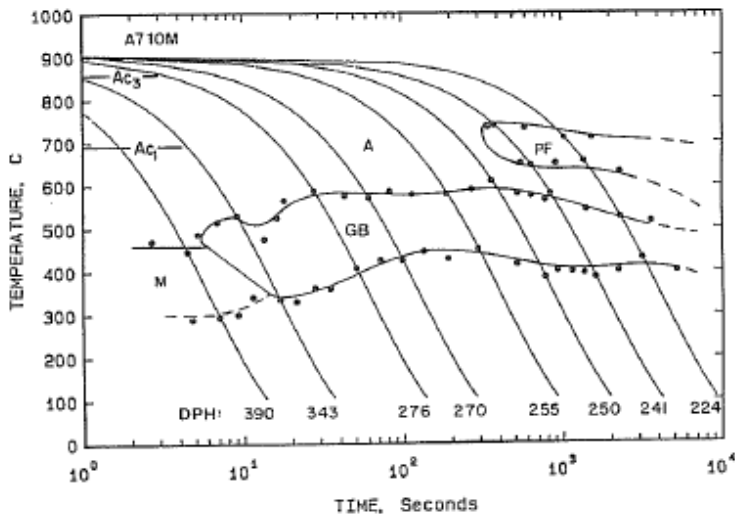
Gambar 2.20 Hasil mikroskop optik yang menunjukkan mikrostruktur setelah aging 30 menit untuk baja A, baja B, dan baja C (a, b, c) hanya diaging (d, e, f) *cool deformation* pada tegangan 0.2

Mikrostruktur baja A, B, C sebagian besar terdiri dari granular bainit. Struktur ini termasuk *irregular ferrite* dengan fase kedua yang terdistribusi antara butir ferit. Fase kedua dapat berupa perlit dan/atau acicular ferit. Ini dapat dilihat dengan jelas bahwa butir menghalus setelah *cool deformation* untuk semua



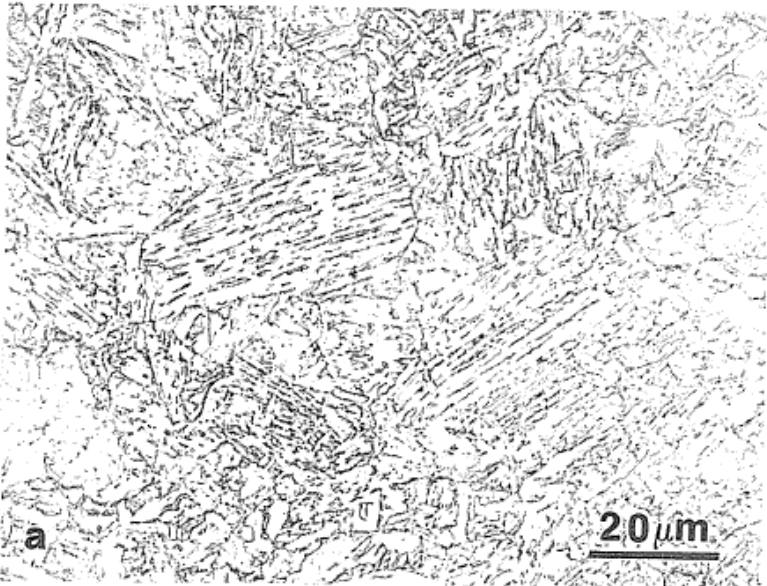
baja jika dibandingkan dengan kondisi hanya *diaging*. Setelah *cool deformation* baja C terlihat memiliki bentuk fraksi volume yang signifikan dari poligonal ferit.

Pada penelitian A. D. Wilson (1987) menyatakan bahwa penambahan tembaga menaikkan kekuatan pada beberapa baja karbon rendah dengan precipitasi partikel yang kaya Cu selama aging. Tembaga juga menaikkan *hardenability* dan menurunkan laju tempering daerah bainit dan martensit selama aging temperatur tinggi. Diagram CCT untuk baja A710 HSLA ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Diagram *Continuous Cooling Transformation* untuk A710 Modified; M= Martensit, GB= Granular bainit, PF= Proeutectoid ferit

Pada kasus A710 Modified, mikrostruktur yang dominan pada laju pendinginan *intermediate* adalah granular bainit. Penampakan tipe dari granular bainit ditunjukkan pada Gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Mikrostruktur HSLA-80/A710 menunjukkan proeutektoid dan acicular ferit. Beberapa juga menunjukkan granular bainit

Granular bainit terdiri dari kumpulan *ferrite lath* dengan non-sementit, *interlath*, partikel fase sekunder. Partikel ini diidentifikasi dengan TEM sebagai austenit sisa atau kombinasi austenit sisa dan martensit.

1.6.2 II.6.2 Pembentukan Produk Ferit Selama Pendinginan Kontinyu Pada Baja HSLA Cu-bearing

Penelitian yang dilakukan oleh S. S Ghasemi tahun 2006 menjelaskan tentang karakterisasi transformasi dan mikrostruktur pada baja Cu- yang merupakan produk transformasi pada temperatur rendah dengan pendinginan kontinyu. Material yang digunakan adalah HSLA dengan komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 2.6 berikut.

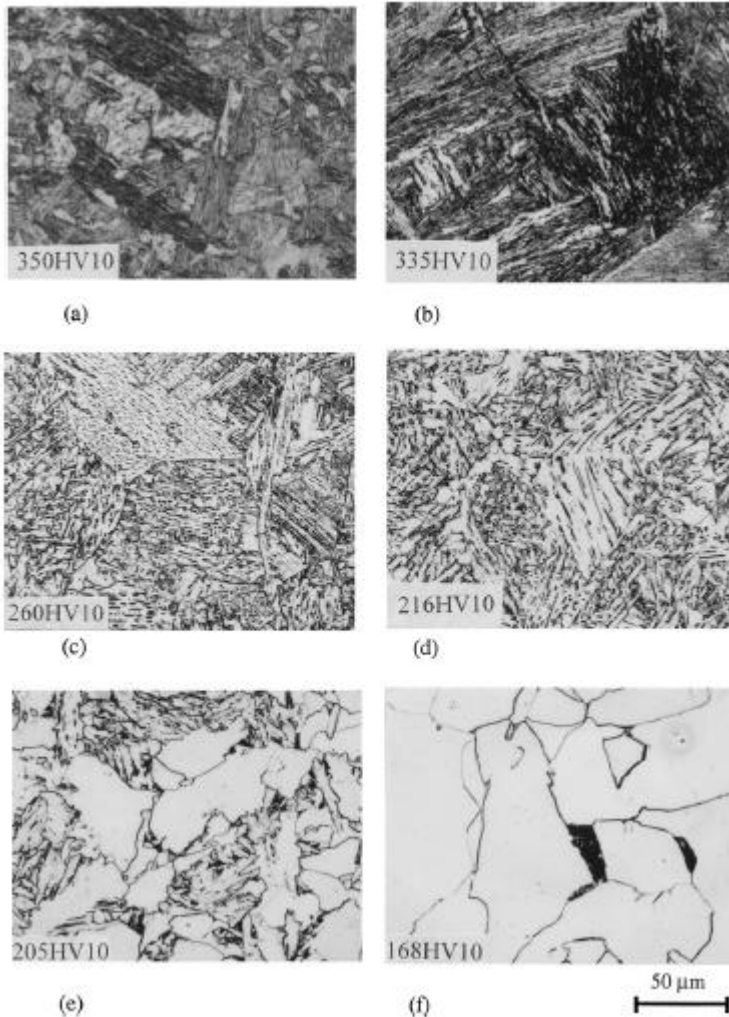


Tabel 2.6 Komposisi kimia (dalam wt%) pada baja HSLA80 yang diinvestigasi

C	Mn	Si	Ni	Cu	Nb	Ti	P	S
0.555	1.40	0.25	0.85	1.10	0.022	0.013	0.012	0.003

Komposisi baja diseleksi dari laboratorium menghasilkan percobaan ingot yang lakukan berbagai prose *hot rolling* dan perlakuan aging. *Slab* baja dihot rolled secara bergantian dari 1200°C dengan rute proses kontrol termomekanik dan kemudian di aging pada 550°C. Dekomposisi austenit pendinginan kontinyu diinvestigasi menggunakan *high-speed Theta Dilatometer*.

Gambar 2.23 menunjukkan contoh mikrostruktur dengan kekerasan yang dihasilkan dari aplikasitransformasi pendinginan kontinyu pada *range* laju pendinginan yang lebar. Mikrostruktur pada spesimen pendinginan cepat media ditunjukkan Gambar 2.23(a) yang dikarakterisasi oleh banyak kelompok *lath* dan garis paralel dari unit tersendiri bainit atau martensit dengan kelompok. Mikrostruktur terbentuk pada laju pendinginan sangat cepat yang mungkin oleh dilatometer yang diduga terdiri dari martensit ditambah bainit ferit, ketika kekerasan (335 HV10) lebih rendah daripada yang dihasilkan setelah pendinginan media air (350 HV10). Struktur tersebut merupakan campuran dari martensit dan bainit ferit, yang tipe struktur bainit ditunjukkan oleh pulau elongasi pendek dari martensit atau sisa austenit. Selanjutnya pada laju pendinginan yang lebih tinggi kristal ferit menjadi lebih halus dan martensit atau unsur austensit menjadi lebih tipis dan terdistribusi seragam dalam matriks bainit.



Gambar 2.23 Kekerasan dengan mikrostruktur yang dihasilkan pada laju pendinginan berbeda : (a)pendinginan air; (b)~375°C/s; (b)27.7°C/s; (d)5 °C/s; (e)1°C/s; (f)0.1°C/s.



Pada laju pendinginan dibawah 20°C/s , poligonal dan quasi poligonal ferit terbentuk pada batas butir *prior-austenit* menjadi meningkat. Pada 5°C/s jumlah batas butir ferit kecil dan struktur memiliki bagian seperti *plate* dan muncul bagian granular, Gambar 2.23(d). Untuk 1°C/s , quasi poligonal ferit mendominasi, tapi daerah granular seperti *plate* terbentuk dalam volume austenit sisa pada Gambar 2.23(e). Gambar 2.23(f) menunjukkan mikrostruktur yang terbentuk pada spesimen yang dinginkan paling lambat, yang terdiri dari fraksi volume besar poligonal ferit, dan daerah dengan kontras gelas yang umumnya perlit atau degenerasi perlit.

BAB III METODOLOGI

III.1 Bahan dan Alat Penelitian

III.1.1 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Baja plat AISI 1006
2. Tembaga murni
3. Metanol
4. HNO_3
5. Kawat baja
6. Metal polish
7. Kain Bludru
8. Gas Argon
9. Poliester
10. Katalis

III.1.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang dipakai dalam penelitian ini adalah:

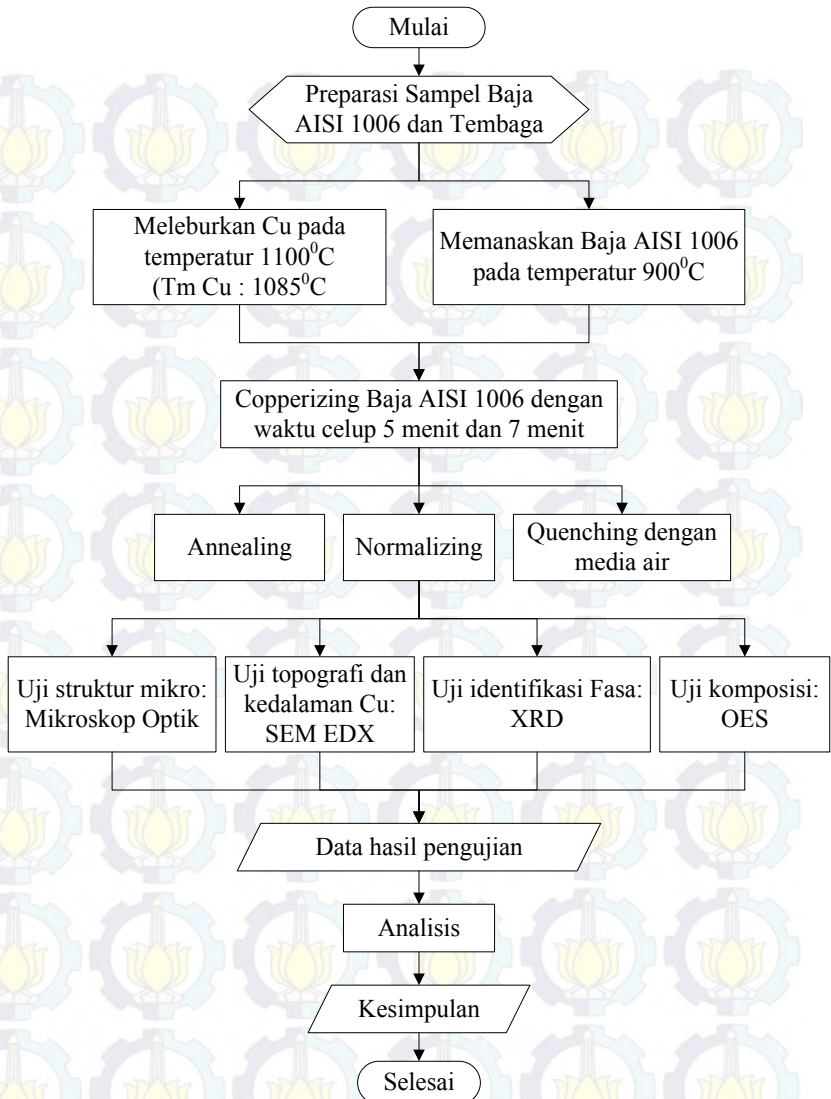
1. Gerinda Tangan
Digunakan untuk memotong dan menggerinda spesimen awal dan hasil pemaduan melalui proses *copperizing*.
2. Gergaji Mesin
Digunakan untuk memotong tembaga menjadi dimensi yang lebih kecil untuk dicairkan.
3. *Crucible* Grafit
Digunakan sebagai wadah dari potongan logam tembaga murni yang akan dicairkan pada proses *copperizing* dalam *furnace*.
4. Muffle Furnace
Alat ini digunakan untuk melakukan pemanasan awal (*pre-heat*) spesimen yang telah disiapkan serta untuk meleburkan potongan logam tembaga murni.



5. Kertas Amplas
Digunakan untuk proses grinding sampel hasil *copperizing* sebagai preparasi uji mikrostruktur.
6. Cutting tool
Digunakan untuk memotong spesimen uji struktur mikro.
7. Bor duduk
Digunakan untuk melubangi spesimen uji yang akan melalui proses *copperizing*.
8. Mesin *polish*
Digunakan untuk memoles spesimen yang akan diuji struktur mikro
9. Penjepit logam
Digunakan untuk mengambil spesimen yang dicelupkan dalam tembaga pada saat *copperizing*.

III.2 Diagram Alir

Diagram alir penelitian yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



III.3 Prosedur Penelitian

III.3.1 Preparasi Sampel Awal

Pada tahap awal sebelum dilaksanakan penelitian, sampel awal berupa plat yang belum diketahui komposisinya dipotong untuk diuji komposisi dengan Optical Emission Spectroscopy (OES) di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Hasil uji komposisi OES pada plat sampel awal

Elements	Ave. wt%	Elements	Ave. wt%
Fe	99.5	Al	0.0454
C	0.0358	Co	< 0.0050
Si	0.02	Cu	0.0375
Mn	0.210	Nb	0.0140
P	0.0091	Ti	< 0.0050
S	0.0080	V	< 0.0050
Cr	0.0276	W	< 0.0050
Mo	< 0.0050	Pb	< 0.0050
Ni	0.0292		

Berdasarkan ASTM A830-A830M, diketahui bahwa sampel plat ini dapat dikategorikan sebagai AISI 1006. Sampel yang berupa plat dipotong menggunakan gergaji tangan dengan dimensi 16 x 30 x 0.3 cm, kemudian dilubangi dengan menggunakan bor dan dikaitkan dengan kawat baja untuk mempermudah pengambilan pada saat proses pencelupan.

III.3.2 Preparasi Peleburan Tembaga

Pada proses peleburan tembaga digunakan tembaga murni sebanyak 1,5 kg untuk tiap proses *copperizing*. Tembaga murni dipotong-potong dengan dimensi sembarang untuk mengisi gastronom *stainless steel* yang akan digunakan untuk meleburkan tembaga dalam *furnace*.



III.3.3 Peleburan Tembaga dan Pemanasan Baja AISI 1006

Tembaga dileburkan dalam *muffle furnace* pada temperatur 1100°C . Selama proses peleburan tembaga berlangsung, spesimen uji baja AISI 1006 yang telah dipreparasi dipanaskan pada temperatur 900°C . Pemanasan awal dilakukan terpisah dengan peleburan tembaga. Pemanasan dilakukan di dalam *muffle furnace* dengan *holding time* dari keseluruhan sampel uji di dalam *muffle furnace* kurang lebih selama 2 jam.

III.3.4 Proses *Copperizing*

Proses *copperizing* pada penelitian ini dilakukan dengan dua parameter uji, yaitu waktu celup dan laju pendinginan dari spesimen yang akan melalui proses *copperizing*. Spesimen uji yang telah dipanaskan sampai temperatur 900°C dan ditahan pada temperatur tersebut selama kurang lebih 2 jam, dikeluarkan satu per satu untuk dilakukan proses pencelupan ke dalam tembaga cair. Proses pencelupan dilakukan selama waktu yang telah ditentukan, yakni selama 5 menit dan 7 menit. Spesimen uji yang telah dicelup di dalam tembaga cair dinginkan dengan variasi pendinginan yang berbeda-beda.

III.3.5 Pengujian

Setelah proses *copperizing* dilakukan beberapa pengamatan dan pengujian terhadap spesimen hasil pepaduan, beberapa pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

a. Pengamatan Makro

Alat : Kamera Canon DSLR EOS 70D

Tujuan : Untuk mengetahui gambar permukaan dan penampang melintang spesimen uji hasil *copperizing* pada skala makro

Prosedur :

- Mengambil foto permukaan masing-masing spesimen uji setelah proses *copperizing*
- Memotong spesimen uji dengan arah melintang menggunakan gergaji tangan



- Mengambil foto penampang melintang spesimen uji
- Menganalisis hasil pengamatan makro

b. Pengamatan Struktur Mikro

Alat : Mikroskop optik Olympus BX51M-RF di laboratorium metalurgi JTMM

Tujuan : Untuk melihat dan mengamati mikrostruktur permukaan pada penampang melintang spesimen uji hasil *copperizing*

Prosedur :

- Memotong spesimen uji dengan ukuran 1 x 1 cm
- Melakukan *mounting* pada penampang melintang spesimen uji menggunakan resin epoksi dan katalis
- Mengamplas spesimen uji hasil *mounting* menggunakan kertas amplas yang berjenjang dimulai dari *grade* 80 sampai 2000 hingga membentuk goresan dengan orientasi arah yang sama sambil dialiri air. Setiap pergantian kertas amplas menuju *grade* yang lebih tinggi, arah orientasi diubah menjadi tegak lurus dengan arah orientasi sebelumnya
- Memoles spesimen uji menggunakan mesin *polish* dengan sebelumnya mengoleskan *metal polish* pada permukaan spesimen uji
- Mengetsa spesimen uji dengan menggunakan etsa nital (HNO_3 1-5 ml, alkohol 100 ml 95%) dan etsa pikrat (asam pikrat/ FeCl_3 4 gr, alkohol 100 ml 95%)
- Mengamati spesimen uji dengan mikroskop optik
- Menganalisis hasil pengamatan struktur mikro



c. Pengamatan *Scanning Electron Microscope*

Alat : *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe FEI INSPECT S50 di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS

Tujuan : Untuk mengamati topografi dari permukaan penampang melintang spesimen uji hasil *copperizing*, kedalaman tembaga, dan persebaran tembaga yang didifusikan ke dalam baja AISI 1006

Prosedur :

- Melakukan preparasi spesimen sesuai standar metalografi seperti pada pengujian mikroskop optik dengan panjang mounting maksimal 2,5 cm dan diameter 1 cm
- Memasukkan spesimen ke mesin SEM dan melakukan uji SEM EDS
- Menganalisis hasil uji SEM EDS dengan perbesaran 5000x

d. Pengamatan *Optical Emission Spectroscopy*

Alat : *Optical Emission Spectroscopy* (OES) di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS)

Tujuan : Untuk mengetahui komposisi pada spesimen uji hasil *copperizing* serta mengetahui persentase tembaga yang telah terdifusi ke dalam spesimen baja AISI 1006 melalui prose *copperizing*

Prosedur :

- Menyiapkan spesimen hasil *copperizing* untuk uji OES dengan ukuran 3 x 2 cm
- Mengamplas spesimen uji dengan kertas amplas dari grade 80 hingga 2000



- Melakukan pengujian OES dan menganalisis hasil uji komposisi OES

e. Pengamatan X-ray Diffraction

Alat : Mesin *X-Ray Diffraction* (XRD) di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS

Tujuan : Untuk mengidentifikasi fase pada spesimen uji hasil *copperizing*, serta untuk mengetahui struktur kristal pada α -Fe yang terdifusi oleh tembaga setelah proses *copperizing*

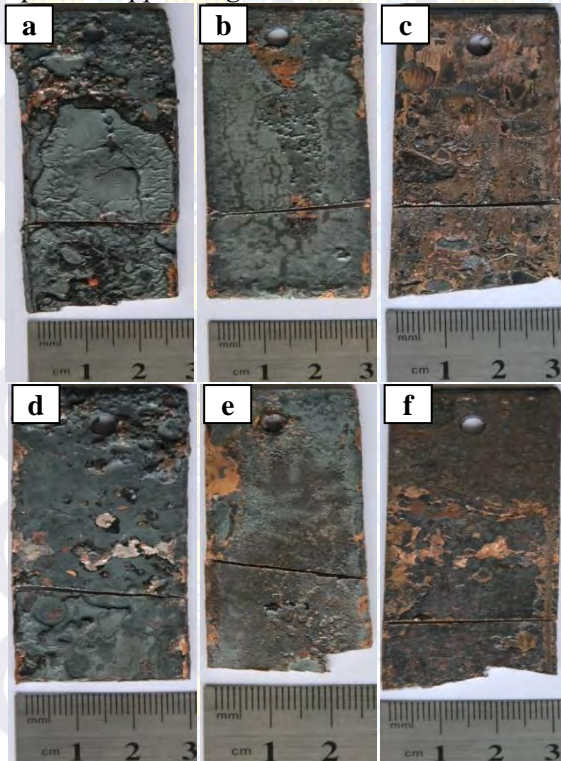
Prosedur :

- Memotong spesimen uji hasil *copperizing*
- Menggerinda spesimen untuk menghilangkan oksida dengan grade 1500
- Melakukan pengujian dan menganalisis hasil XRD

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Pengamatan Makro

Pengamatan makro dilakukan dengan menggunakan kamera SLR dan mikroskop stereo untuk melihat gambar hasil permukaan dan penampang melintang spesimen uji setelah dilakukan proses *copperizing*.

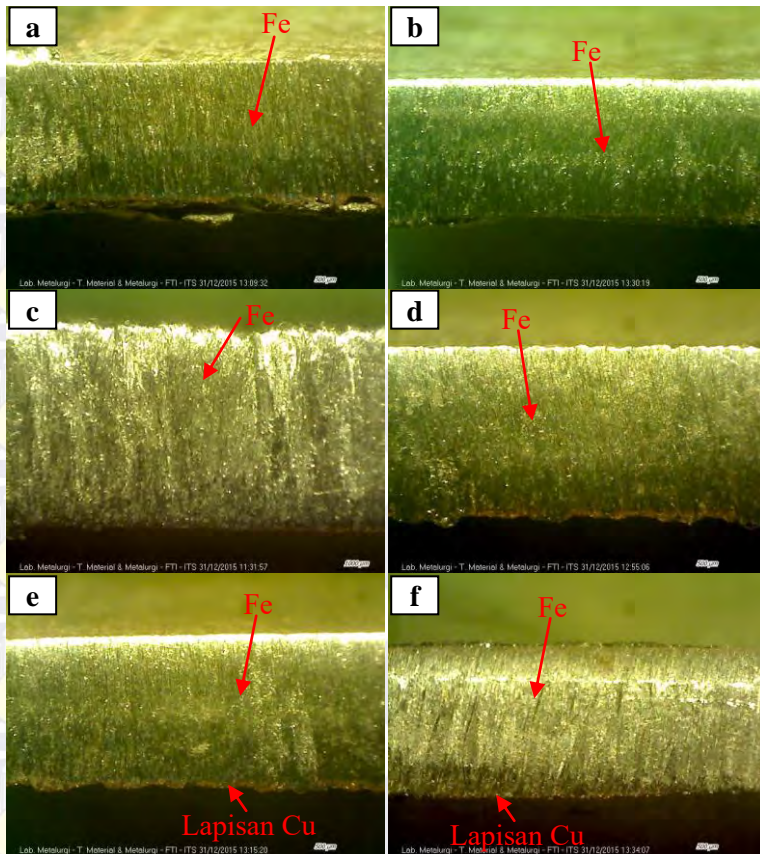


Gambar 4.1 Hasil pengambilan gambar visual permukaan baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 5 menit dengan laju pendinginan (a)anil, (b)normal, (c)*quench*, dan setelah *copperizing* selama 7 menit dengan variasi laju pendinginan (d)anil, (e)normal, (f)*quench*



Pada hasil gambar permukaan spesimen uji setelah *copperizing* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 secara keseluruhan terlihat bahwa terdapat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan dan juga lapisan oksida berwarna kehitaman menutupi seluruh permukaan spesimen baja AISI 1006. Pada gambar permukaan spesimen *copperizing* 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan anil yang ditunjukkan pada Gambar 4.1(a) dan (d) memperlihatkan lapisan Cu dan lapisan oksida yang tebal serta tidak rata. Jika dibandingkan dengan spesimen *copperizing* 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan normal pada Gambar 4.1 (b) dan (f) memperlihatkan lapisan tembaga dan lapisan oksida yang lebih rata. Sedangkan untuk gambar permukaan spesimen *copperizing* 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan cepat media air (*quench*) yang ditunjukkan Gambar 4.1(c) dan (e) memperlihatkan lapisan tembaga yang rata serta lebih banyak pada permukaan baja AISI 1006.

Gambar hasil penampang melintang spesimen uji baja AISI 1006 setelah proses *copperizing* diambil menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 10x yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Hasil pengambilan gambar dengan mikroskop stereo bagian penampang melintang baja AISI 1006 setelah *copperizing* pendinginan anil dengan waktu celup (a)5 menit, (b)7 menit, setelah *copperizing* pendinginan normal dengan waktu celup (c)5 menit, (d)7 menit, dan setelah *copperizing* pendinginan quench dengan waktu celup (e)5 menit, (f)7 menit

Secara keseluruhan hasil pengamatan penampang melintang spesimen uji menunjukkan bahwa adanya lapisan Cu yang terbentuk dipermukaan spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing*. Lapisan Cu yang terlihat hanya dibagian luar



permukaan baja AISI 1006 saja. Pada spesimen *copperizing* pendinginan *quench* terlihat lapisan Cu yang terbentuk lebih tebal daripada spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil dan pendinginan normal. Ini disebabkan karena saat baja AISI 1006 diangkat dari tembaga cair masih ada tembaga cair yang menempel dipermukaan baja, kemudian baja langsung didinginkan sehingga sisa tembaga cair yang masih menempel pada permukaan baja langsung mengeras dan membentuk lapisan Cu di permukaan baja. Sedangkan di bagian dalam baja AISI 1006 tidak terlihat Cu yang berdifusi ke dalam baja. Hal ini dikarenakan yang berdifusi adalah atom Cu, sehingga skalanya adalah skala atom. Oleh karena itu ketika menggunakan skala makro ataupun skala mikro tidak terlihat Cu yang masuk. Ada atau tidaknya Cu yang berdifusi ke baja dapat diketahui dengan uji komposisi untuk mengetahui kadar Cu dalam baja AISI 1006 meningkat atau tidak.

IV.2 Hasil Pengujian OES

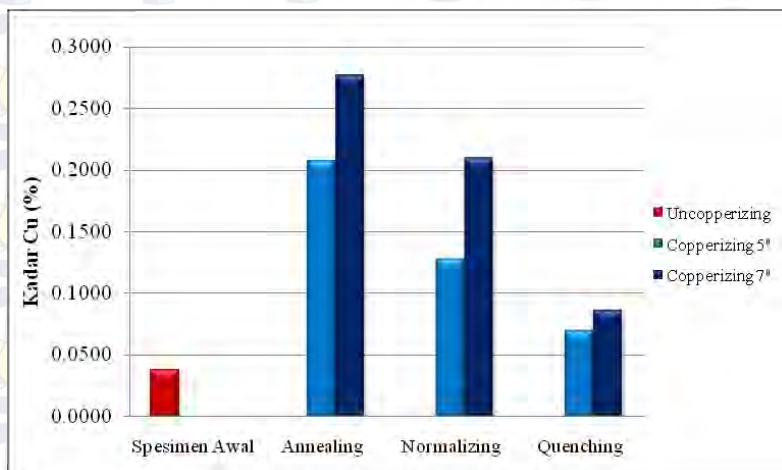
Pengujian *Optical Emmission Spectroscopy* (OES) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia pada spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah proses *copperizing*, sehingga dapat diketahui persentase tembaga yang masuk. Hasil pengujian OES yang telah dilakukan ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Komposisi Baja AISI 1006 Hasil Uji OES Masing-masing Spesimen Uji

Spesimen	Kadar (%)					
	Fe	C	Mn	P	S	Cu
Awal	99.5	0.0358	0.21	0.0091	0.008	0.0375
5' anil	93.8	0.231	0.196	0.222	>0.12	0.207
7' anil	99.2	0.0607	0.23	0.0182	0.009	0.277
5' normal	99.3	0.0112	0.175	0.0335	0.0268	0.128
7' normal	99.3	0.103	0.194	0.0117	0.0083	0.21
5' quench	99.5	0.0063	0.188	0.0161	0.0105	0.0696
7' quench	99.4	0.0721	0.218	0.0142	0.009	0.086



Berdasarkan hasil pengujian OES tersebut, kadar tembaga yang terkandung terlihat mengalami perubahan persentase pada masing-masing spesimen uji. Perbandingan persentase kadar tembaga untuk masing-masing spesimen uji ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan komposisi tembaga masing-masing spesimen uji

Dari hasil grafik pada Gambar 4.3 terlihat bahwa terdapat kenaikan jumlah kadar tembaga (Cu) pada spesimen uji baja AISI 1006 setelah dilakukan proses *copperizing*. Berdasarkan hasil pengujian komposisi tersebut, banyaknya pertambahan persentase tembaga dipengaruhi oleh lamanya waktu celup dan laju pendinginannya. Semakin lama waktu celup saat proses *copperizing*, maka semakin banyak kadar tembaga yang masuk ke dalam spesimen uji baja AISI 1006. Ini terlihat pada grafik yang menunjukkan lebih tingginya persentase tembaga pada spesimen uji yang dicelup selama 7 menit dibandingkan dengan spesimen uji yang celup selama 5 menit dengan berbagai variasi laju pendinginan.



Sedangkan pada pengaruh laju pendinginan terlihat bahwa dengan pendinginan yang sangat lambat yaitu dengan pendinginan *furnace* (*annealing*) akan memberikan kadar tembaga yang paling banyak dibandingkan dengan pendinginan udara (*normalizing*) dan pendinginan cepat media air (*quenching*). Berdasarkan grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin cepat laju pendinginan, maka kadar tembaga yang masuk semakin sedikit, sebaliknya semakin lama pendinginannya, maka kadar tembaga semakin bertambah. Hal ini disebabkan karena dengan pendinginan yang sangat lambat, atom tembaga masih memiliki cukup energi yang lebih banyak untuk dapat masuk kedalam baja.

IV.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dengan menggunakan etsa nital dilakukan untuk mengetahui perubahan mikrostruktur pada spesimen baja AISI 1006 setelah dilakukan proses *copperizing* menggunakan mikroskop optik. Perubahan mikrostruktur yang dianalisis meliputi ukuran butir, bentuk fase, dan orientasi bentuk butir terhadap pengaruh waktu celup dan laju pendinginan. Perbesaran yang digunakan dalam pengambilan gambar struktur mikro pada penelitian ini adalah 200x. Berikut ini ditampilkan gambar hasil struktur mikro spesimen baja AISI 1006 sebelum *copperizing* dan setelah *copperizing*.

IV.3.1 Pengaruh Waktu Celup Terhadap Struktur Mikro

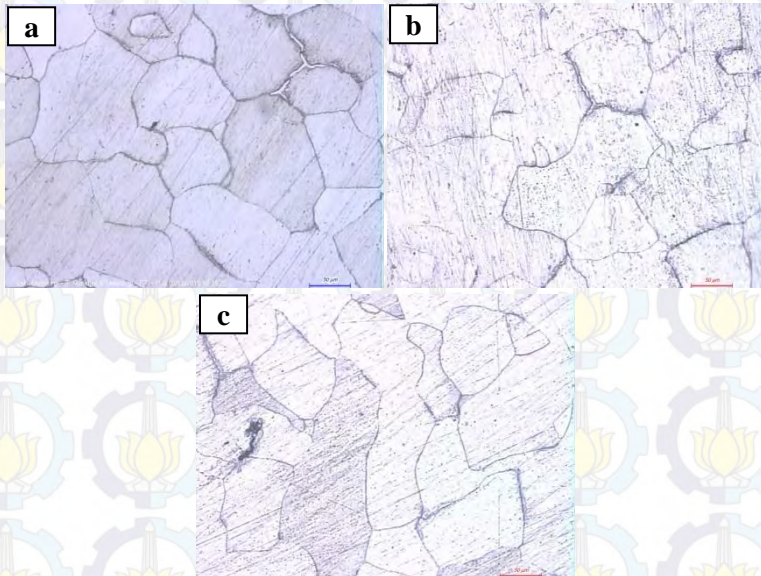
Adanya pengaruh waktu celup terhadap perubahan mikrostruktur pada spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* akan dibahas pada sub-bab ini.

a. Mikrostruktur Baja AISI 1006 Sebelum dan Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan *Furnace* (*Annealing*)

Pengamatan struktur mikro baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan anil diambil pada dua bagian yakni dibagian tengah dan tepi untuk mengetahui perbedaan struktur mikronya karena pengaruh penambahan tembaga lebih banyak terdapat dibagian tepi yang dekat dengan



permukaan. Hal ini dikarenakan proses difusi terjadi dimulai dari permukaan ke tengah.



Gambar 4.4 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *annealing* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum *copperizing* perlakuan *annealing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tengah, (c)*copperizing* 7 menit bagian tengah

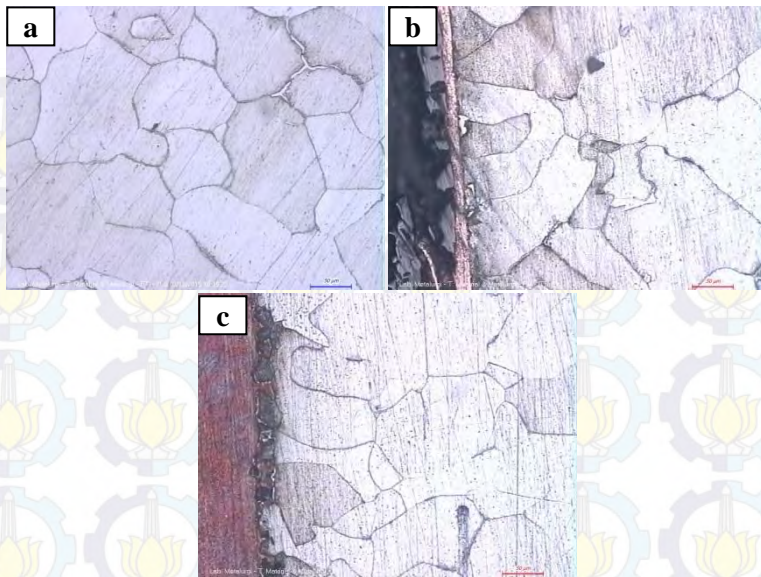
Hasil struktur mikro baja AISI 1006 sebelum *copperizing* dan setelah *copperizing* dengan pendinginan *furnace (annealing)* ditunjukkan pada Gambar 4.4. Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro baja AISI 1006 sebelum *copperizing* yang diberi perlakuan *annealing* pada Gambar 4.4(a) menunjukkan bahwa struktur mikronya memiliki bentuk butir bulat. Luas ukuran butir rata-rata baja AISI 1006 *annealing uncopperizing* tersebut dengan metode perhitungan Heyn-Intercept adalah $31392.5632 \mu\text{m}^2$. Pada batas butir *annealing uncopperizing* terlihat ada beberapa bagian batas butir yang melebar.



Jika dibandingkan dengan hasil pengamatan pada Gambar 4.4(b) yang merupakan mikrostruktur baja AISI 1006 setelah *copperizing* 5 menit dengan pendinginan *furnace (annealing)* di bagian tengah menunjukkan adanya perubahan bentuk butir dan ukuran butir. Bentuk butir yang awalnya bulat-bulat menjadi sedikit memanjang dan bentuknya tidak seragam, sedangkan untuk ukuran butir dengan menggunakan metode perhitungan Heyn Intercept berubah menjadi semakin kecil. Luas ukuran butir rata-rata pada spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* 5 menit pendinginan anil yaitu sebesar $20277.901 \mu\text{m}^2$. Sedangkan struktur mikro baja AISI 1006 setelah *copperizing* 7 menit pendinginan anil seperti pada Gambar 4.4(c) menunjukkan bentuk butir yang semakin memanjang. Untuk luas ukuran butir rata-rata setelah dilakukan perhitungan menggunakan metode Heyn Intercept didapatkan luas ukuran butirnya semakin mengecil yaitu sebesar $12981.8712 \mu\text{m}^2$. Batas butir spesimen setelah *copperizing* dengan pendinginan anil juga ada beberapa bagian yang melebar.

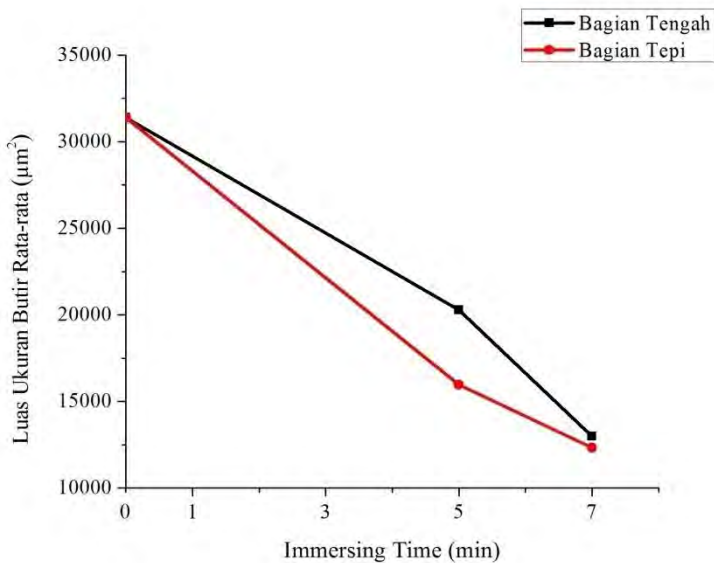
Semakin lama waktu celup menunjukkan bahwa kadar tembaga menjadi lebih tinggi berdasarkan hasil OES. Dengan meningkatnya kadar tembaga menyebabkan ukuran butir menjadi lebih kecil. Mengecilnya ukuran butir ini menunjukkan bahwa butir ferit diperhalus dengan meningkatnya kadar tembaga. Mekanisme penghalusan butir pada struktur ferit dalam Fe-Cu paduan biner adalah karena peningkatan *driving force* pada transformasi feritik yang besar dan penurunan pertumbuhan ferit melalui penambahan tembaga setelah transformasi feritik yang besar dicapai. Selain itu laju nukleasi pada austenit meningkat dengan penambahan tembaga (Syarif et al, 2010).

Untuk spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil pada bagian tepi ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *annealing* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum *copperizing* perlakuan *annealing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tepi, (c)*copperizing* 7 menit bagian tepi

Pada daerah di bagian tepi terlihat adanya lapisan tembaga yang terbentuk seperti pada Gambar 4.5(a)(b). Akan tetapi dari hasil pengamatan terlihat bahwa tembaga pada spesimen *copperizing* 7 menit (Gambar 4.5(c)) sedikit masuk ke dalam baja AISI 1006, tidak seperti spesimen *copperizing* 5 menit anil (Gambar 4.5(b)) yang sangat jelas membentuk lapisan. Jika dibandingkan dengan bentuk butir dibagian tengah, bentuk butir dan ukuran butir dibagian tepi terlihat semakin mengecil dan semakin tidak beraturan. Dari hasil perhitungan luas ukuran butir dengan metode Heyn Intercept menunjukkan bahwa luas ukuran butir spesimen *copperizing* 5 menit anil adalah $15957.9912 \mu\text{m}^2$, sedangkan luas ukuran butir spesimen *copperizing* 7 menit anil adalah $12322.4008 \mu\text{m}^2$.

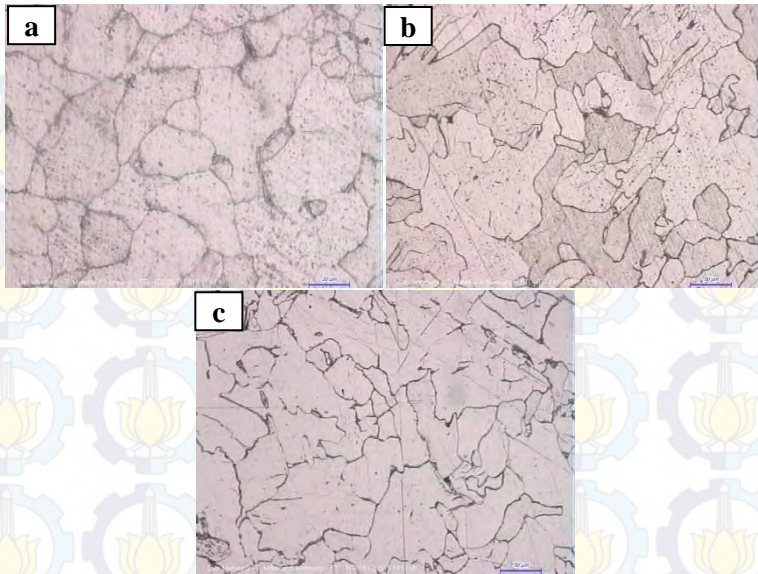


Gambar 4.6 Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan *furnace* (*annealing*) pada bagian tengah dan tepi

Dari hasil grafik pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa luas ukuran butir rata-rata mengecil seiring dengan semakin lamanya waktu celup. Pada bagian tengah dan bagian tepi memberikan luas ukuran butir yang berbeda. Pada luas ukuran butir di bagian tepi cenderung lebih kecil dibandingkan dengan luas ukuran butir di bagian tengah. Hal ini disebabkan karena pada bagian tepi lebih banyak kadar Cu yang masuk daripada di bagian tengah.

b. Mikrostruktur Baja AISI 1006 Sebelum dan Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan Udara (*Normalizing*)

Hasil struktur mikro untuk spesimen baja AISI 1006 sebelum *copperizing* dengan perlakuan *normalizing* dan spesimen setelah *copperizing* dengan pendinginan *normalizing* pada bagian tengah ditunjukkan pada Gambar 4.7.



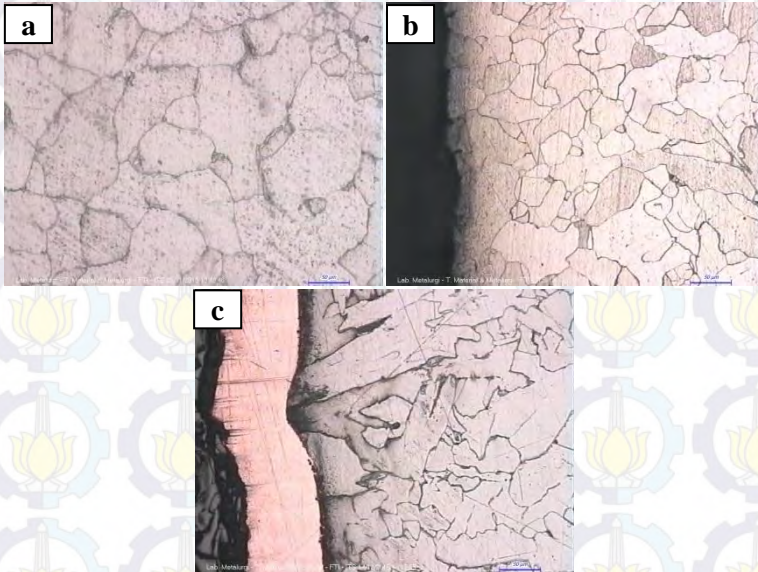
Gambar 4.7 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *normalizing* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum *copperizing*perlakuan *normalizing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tengah, (c)*copperizing* 7 menit bagian tengah

Untuk struktur mikro baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing*dengan pendinginan *normalizing* ditunjukkan pada Gambar 4.7.Hasil struktur mikro menunjukkan bentuk butir yang bulat-bulat pada spesimen sebelum *copperizing* dengan perlakuan *normalizing* (Gambar 4.7(a)) yang merupakan fase ferit.Struktur mikro setelah *copperizing* memperlihatkan perubahan bentuk butir menjadi bentuk yang tidak beraturan dan tidak seragam di bagian tengah.

Luas ukuran butirnya menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan spesimen awal sebelum *copperizing*. Spesimen awal *normalizing uncopperizing* memiliki luas ukuran butir sebesar $3957.1246\mu\text{m}^2$. Sedangkan luas ukuran butir spesimen setelah *copperizing* 5 menit normal dibagian tengah sebesar 3634.2392



μm^2 dan spesimen setelah *copperizing* 7 menit normal dibagian tengah sebesar $2670.8070\mu\text{m}^2$.

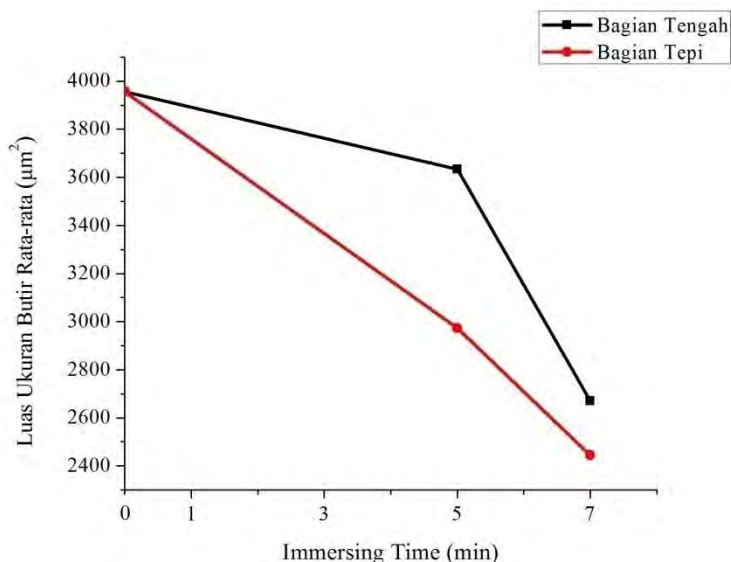


Gambar 4.8 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *normalizing* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen(a)sebelum *copperizing*perlakuan *normalizing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tepi, (c)*copperizing* 7 menit bagian tepi

Gambar 4.8 tersebut menunjukkan struktur mikro baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* pendinginan udara (*normalizing*) yang diambil dibagian tepi. Hasil mikrostruktur menunjukkan butir baja AISI 1006. Pada struktur mikro spesimen *copperizing* 5 menit normal dibagian tepi (Gambar 4.8(b)) tidak menunjukkan adanya lapisan tembaga. Dibagian tepi butirannya berbentuk bulat-bulat seperti spesimen sebelum *copperizing* akan tetapi butir spesimen *copperizing* 5 menit normal lebih rapat dan lebih kecil. Luas ukuran butir spesimen *copperizing* 5 menit normal dibagian tepi adalah $2972.8792\mu\text{m}^2$. Sedangkan pada Gambar 4.8(c) yang merupakan struktur mikro spesimen



copperizing 5 menit normal bagian tepi memperlihatkan adanya lapisan tembaga. Bentuk butirnya memanjang dan tidak beraturan. Hasil perhitungan luas ukuran butir spesimen *copperizing* 7 menit normal dibagian tepi menunjukkan pengecilan butir dibandingkan dengan spesimen *copperizing* 5 menit. Luas ukuran butir untuk spesimen *copperizing* 7 menit normal dibagian tepi adalah $2444.355 \mu\text{m}^2$.



Gambar 4.9 Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan udara (*normalizing*) pada bagian tengah dan tepi

Berdasarkan hasil grafik perbandingan luas ukuran butir spesimen sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan normal menunjukkan pengecilan luas ukuran butir baik pada bagian tengah maupun bagian tepi. Dari grafik pada Gambar 4.9 terlihat bahwa semakin lama waktu celup proses *copperizing* yang mengindikasikan bahwa semakin banyak kadar Cu

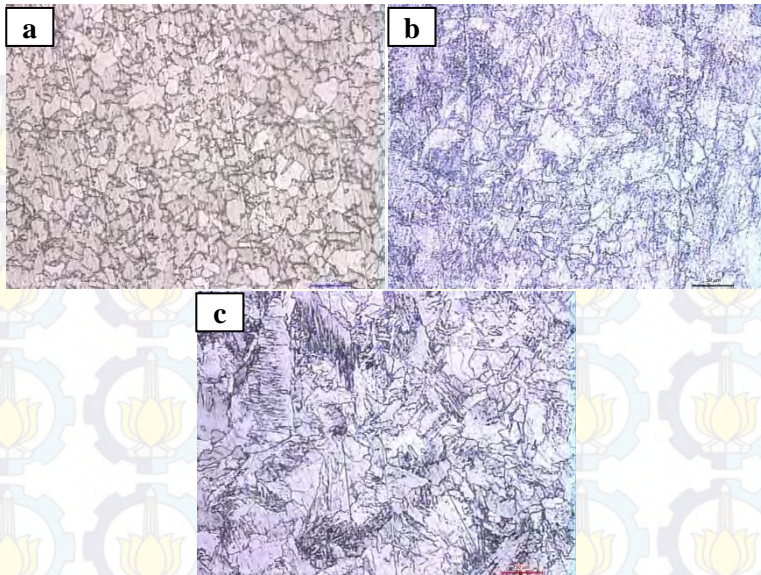


menunjukkan luas ukuran butir yang semakin kecil. Hal ini terlihat pada luas ukuran butir spesimen *copperizing* 7 menit normal lebih kecil dibandingkan dengan luas ukuran butir spesimen *copperizing* 5 menit normal.

Ukuran butir yang semakin kecil dengan penambahan Cu juga sesuai dengan observasi metalografi yang dilakukan oleh Ruddle (2002) yang menunjukkan bahwa adanya pengecilan ferit diakibatkan oleh adanya Cu yang menghambat rekristalisasi austenit dan menghambat transformasi austenit ke ferit.

c. Mikrostruktur Baja AISI 1006 Sebelum dan Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan *Quenching*

Untuk hasil uji struktur mikro dengan mikroskop optik pada baja AISI 1006 sebelum *copperizing* perlakuan *quenching* dan setelah *copperizing* dengan pendinginan cepat media air (*quenching*) ditunjukkan Gambar 4.10.



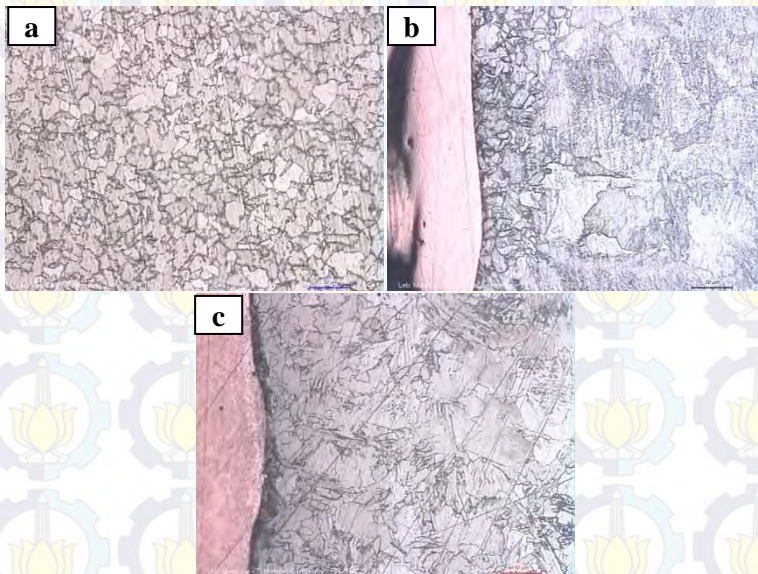
Gambar 4.10 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *quenching* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum *copperizing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tengah, (c)*copperizing* 7 menit bagian tengah

Pengamatan struktur mikro pada baja AISI 1006 yang telah diberi perlakuan panas dengan pendinginan cepat media air (*quenching*) dan baja AISI 1006 setelah *copperizing* menunjukkan bentuk butir yang tidak beraturan pada bagian tengah seperti pada Gambar 4.10. Pada struktur mikro spesimen kontrol baja AISI 1006 *uncopperizing* (Gambar 4.10(a)) tidak terlihat fase martensit karena kadar karbonnya yang sangat rendah yaitu sekitar 0,03% karbon. Ukuran butirannya kecil, luasnya adalah $1656.808 \mu\text{m}^2$. Pada struktur mikro baja AISI 1006 setelah dilakukan proses *copperizing* selama 5 menit pendinginan *quench* menunjukkan bentuk butir yang runcing pada bagian tengah yang ditunjukkan pada Gambar 4.10(b). Luas ukuran butirnya adalah $1420.808 \mu\text{m}^2$. Sedangkan struktur mikro baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit *quench* di bagian tengah



pada Gambar 4.10(c) juga membentuk butir yang runcing seperti flake (serpihan). Untuk luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit *quench* semakin mengecil, yakni besarnya adalah $987.866\mu\text{m}^2$.

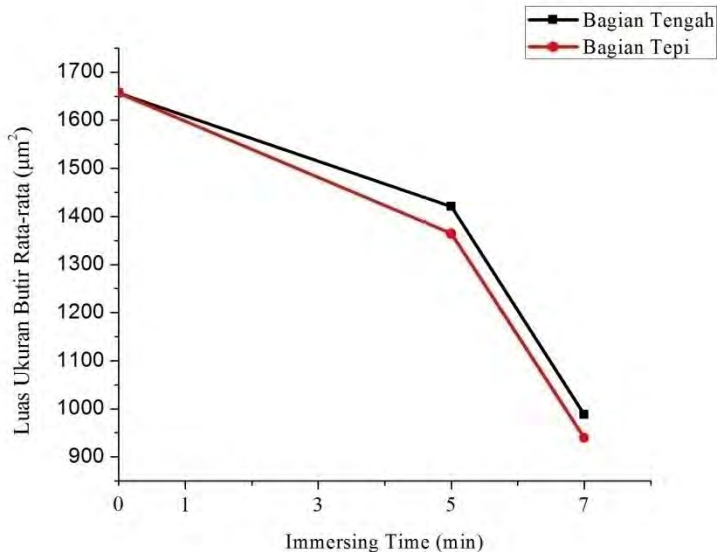
Struktur mikro dibagian tepi untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit dan 7 menit pendinginan *quenching* ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Mikrostruktur baja AISI 1006 dengan pendinginan *quenching* menggunakan perbesaran 200x untuk spesimen (a)sebelum *copperizing*, (b)*copperizing* 5 menit bagian tepi, (c)*copperizing* 7 menit bagian tepi



Hasil mikrostruktur baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 5 menit dibagian tepi menunjukkan bentuk ukuran butir yang berupa bulat-bulat kecil dekat dengan lapisan tembaga yang ditunjukkan pada Gambar 4.11(b). Luas ukuran butirnya sendiri adalah $1363.9688 \mu\text{m}^2$. Ukuran butirnya menjadi lebih kecil di bagian tepi dibandingkan dengan di bagian tengah. Pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *quench* (Gambar 4.11(c)) hasil struktur mikronya menunjukkan bentuknya agak bulat tetapi tidak beraturan dan tidak seragam. Luas ukuran butir rata-rata untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit *quench* adalah $939.678 \mu\text{m}^2$.



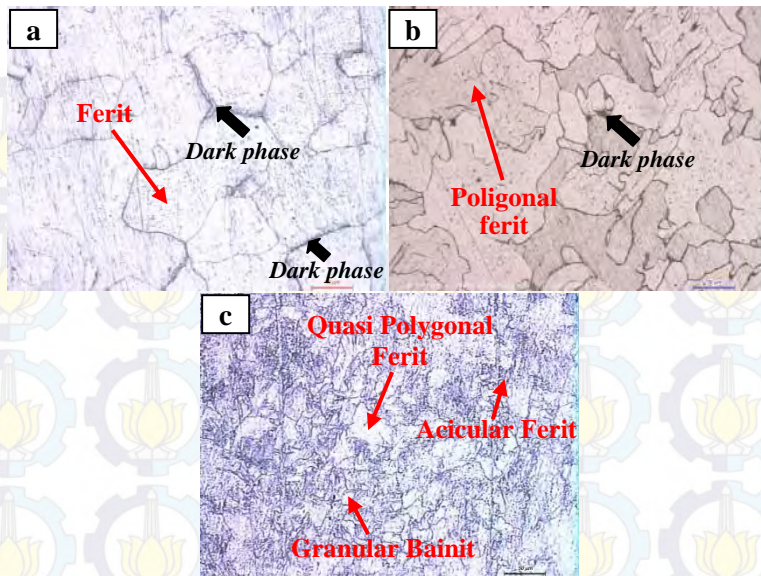
Gambar 4.12 Perbandingan luas ukuran butir rata-rata spesimen baja AISI 1006 sebelum dan setelah *copperizing* dengan pendinginan cepat media air (*quenching*) pada bagian tengah dan tepi



Dari hasil grafik perbandingan luas ukuran butir dengan pendinginan *quench* yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menunjukkan pengecilan butir. Dengan waktu celup yang semakin lama menyebabkan luas ukuran butir semakin kecil. Ini terlihat pada luas ukuran butir pada spesimen baja AISI 1006 dengan penambahan tembaga melalui proses *copperizing* yang mengecil dibandingkan dengan spesimen awal sebelum *copperizing* yang diberi perlakuan *quenching*. Perbedaan ukuran butir di bagian tengah dan di bagian tepi tidak berbeda jauh. Ini mengindikasikan bahwa kadar Cu di bagian tengah dan tepi tidak berbeda jauh. Hal ini juga dipengaruhi oleh kadar Cu pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan *quench* yang kecil pada hasil OES.

IV.3.2 Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Struktur Mikro

Perbandingan struktur mikro spesimen *copperizing* dengan berbagai laju pendinginan untuk menjelaskan adanya pengaruh laju pendinginan terhadap perubahan mikrostruktur ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14. Dari gambar struktur mikro tersebut terlihat pengaruh laju pendinginan pada proses *copperizing*.

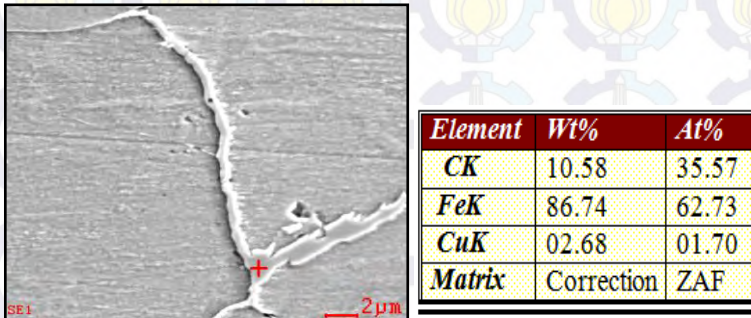


Gambar 4.13 Struktur mikro baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 5 menit menggunakan perbesaran 200x (a)pendinginan anil, (b)pendinginan normal, dan (c)pendinginan media air/*quench*

Pengaruh laju pendinginan pada strukur mikro spesimen baja AISI 1006 setelah proses *copperizing* yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 adalah hampir sama seperti pengaruh laju pendinginan baja pada umumnya, yakni ukuran butir semakin mengecil dengan laju pendinginan yang semakin cepat (Wahid Suherman, 2001). Pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil (Gambar 4.13(a)) menunjukkan morfologi campuran butir ferit bersama dengan distribusi fase gelap di batas butir ferit dan di titik pertemuan tiga batas butir. Sedangkan pada Gambar 4.13(b) yang merupakan spesimen *copperizing* dengan pendinginan normal juga memperlihatkan distribusi fase gelap yang sama meskipun jumlahnya lebih sedikit. Akan tetapi pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan *quench* yang ditunjukkan Gambar 4.13(c) tidak begitu jelas terlihat.



Untuk mengetahui fase apa yang terdapat pada batas butir ferit tersebut dilakukan *spotting* pada uji SEM EDX dengan menembak tepat di batas butir yang ditunjukkan Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil uji fasa dengan SEM EDX pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit pendinginan anil di bagian batas butir

Dari hasil *spotting* SEM EDX pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa pada batas butir mengandung fase Fe dan Cu. Seperti pada penelitian S. K. Ghosh (2009) yang melakukan penambahan Cu pada baja Ti-B dengan termomekanik yang menunjukkan daerah perlit gelap. Dari hasil tersebut mengindikasikan bahwa penambahan Cu menahan pembentukan perlit dibawah laju pendinginan yang sebanding dengan pendinginan udara, sehingga yang terlihat bukan fase perlit melainkan fase Fe dan fase Cu.

Fase yang terbentuk pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil (Gambar 4.14 (a)) menunjukkan fase ferit. Hal ini dapat dijelaskan dengan diagram fase Fe-Cu pada Gambar 2.12 yang menunjukkan bahwa dengan pendinginan sangat lambat mendekati kondisi ekuilibrium akan terbentuk fase ferit yang merupakan transformasi dari fase austenit. Pada temperatur kamar kelarutan Cu di dalam Fe terbatas sehingga ada Cu yang keluar kebatas butir Fe. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya penebalan pada batas butir spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil. Batas butir yang menebal tersebut merupakan

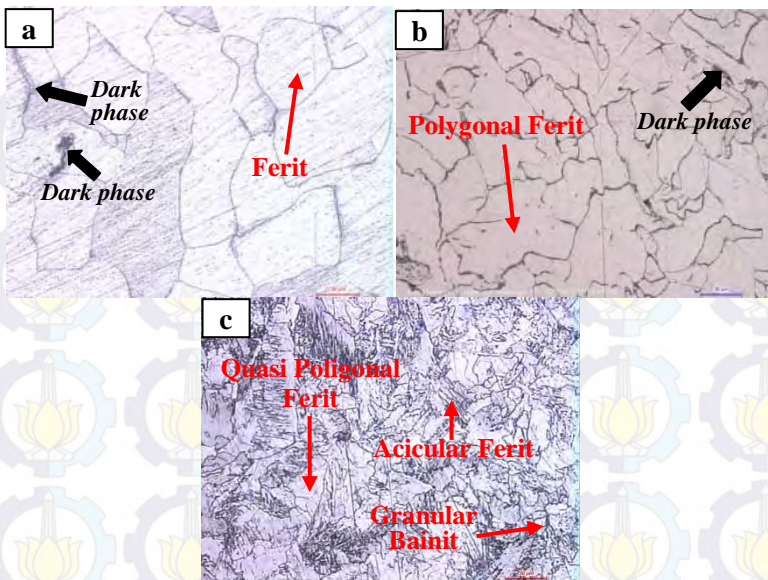


dark phase yang terdiri dari fase Cu dan fase Fe. Pada penelitian Ghasemi (2006) mengatakan bahwa fase/daerah gelap merupakan perlit atau degenerasi perlit. Akan tetapi adanya Cu menghambat pembentukan perlit seperti yang dijelaskan pada penelitian S. K. Ghosh (2009), sehingga tidak terlihat perlit.

Pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan normal yang ditunjukkan oleh Gambar 4.14 (b) fase yang terbentuk adalah poligonal ferit dengan adanya *dark phase* yang merupakan fase Fe dan fase Cu. Poligonal ferit digambarkan sebagai proeutektoid ferit. Butir ferit tersebut halus, refleksi terang, dan berwarna putih, dan butir ferit sama-sama dipisahkan batas linear secara kontinyu seperti yang dijelaskan oleh Krauss (2015). Pembentukan poligonal ferit sendiri telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya yakni pada sub bab II.1.2.

Sedangkan pada spesimen *copperizing* 5 menit dengan pendinginan cepat media air (*water quench*) menunjukkan struktur granular bainit dengan morfologi granular (butiran). Seperti pada penelitian Elwazri (2008) yang menunjukkan bahwa granular bainit termasuk iregular ferit dengan fase sekunder yang terdistribusi di antara butir ferit. Fase kedua yang terlihat berupa acicular ferit dengan bentuk segaris, elongasi, dan paralel. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh S. K. Ghosh (2009) yang menunjukkan bahwa morfologi dari produk dekomposisi austenit adalah *acicular* alami. Ini terbukti dengan keberadaan fase ferit dengan batas yang tidak beraturan. Selain itu juga terlihat fase quasi poligonal ferit dengan batas yang bergerigi. Pada penelitian S. K. Ghosh (2009) juga menjelaskan bahwa fase ferit terbentuk selama transformasi fase tunggal austenit menjadi fase tunggal ferit dengan pendinginan cepat pada *low carbon steel* dan telah ditetapkan sebagai *quasi-polygonal ferrite* oleh ISIJ Bainite Committee. Ciri-ciri dan proses pembentukan dari granular bainit, acicular ferit, dan quasi poligonal ferit juga telah dijelaskan pada sub bab II.2.1 sebelumnya.

Untuk perbandingan struktur mikro dengan berbagai variasi pendinginan pada spesimen *copperizing* 7 menit ditunjukkan Gambar 4.15.

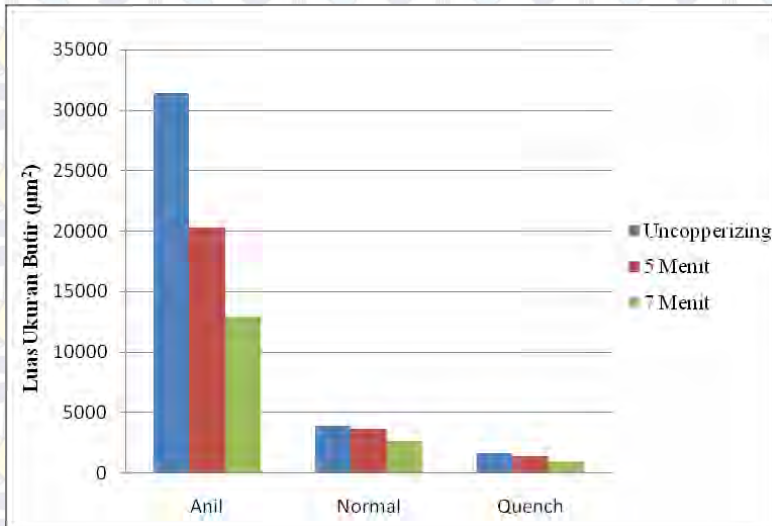


Gambar 4.15 Struktur mikro baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 7 menit menggunakan perbesaran 200x (a)pendinginan anil, (b)pendinginan normal, dan (c)pendinginan media air/*quench*

Gambar 4.15 yang merupakan perbandingan struktur mikro pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit dengan berbagai variasi laju pendinginan menunjukkan hal yang sama seperti pada spesimen *copperizing* 5 menit. Akan tetapi adanya campuran butir ferit bersama dengan distribusi fase gelap terlihat lebih banyak pada spesimen *copperizing* 7 menit pendinginan anil seperti Gambar 4.15(a) dan menjadi semakin berkurang pada spesimen *copperizing* 7 menit dengan pendinginan normal (Gambar 4.15(b)). Pada spesimen *copperizing* 7 menit anil memiliki fase ferit seperti pada spesimen *copperizing* 5 menit anil, dan pada spesimen *copperizing* 7 menit pendinginan normal juga sama dengan fase pada spesimen *copperizing* 5 menit normal yaitu poligonal ferit. Sedangkan pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan *quench* juga menunjukkan fase



yang samayaitu granular bainit seperti pada spesimen *copperizing* 5 menit *quench* dengan fase sekunder acicular ferit.



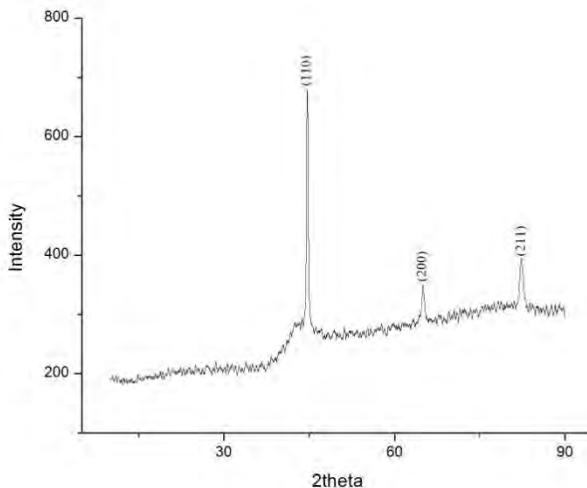
Gambar 4.16 Perbandingan luas ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* pada bagian tengah dengan berbagai variasi laju pendinginan

Berdasarkan grafik perbandingan luas ukuran butir dengan berbagai variasi laju pendinginan yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 terlihat bahwa ukuran butir spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* mengecil jika dibandingkan dengan spesimen awal dengan pendinginan yang sama. Seiring dengan laju pendinginan yang semakin cepat menyebabkan ukuran butir semakin mengecil. Hal ini sesuai dengan teori pengaruh laju pendinginan baja pada umumnya yang menunjukkan semakin cepat laju pendinginan, menyebabkan ukuran butir menjadi semakin kecil/halus (Wahid Suherman, 2001).



IV.4 Hasil Pengujian XRD

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) ini dilakukan untuk mengidentifikasi fase baja AISI 1006 setelah proses *copperizing*. Gambar 4.17 menunjukkan hasil pengujian XRD untuk baja AISI 1006 tanpa perlakuan.

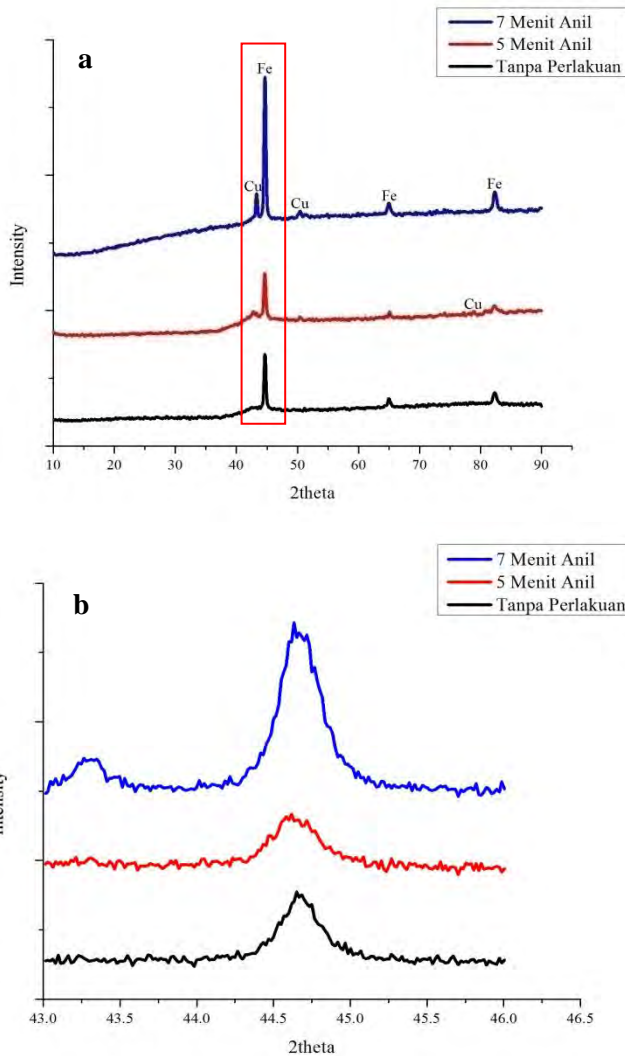


Gambar 4.17 Grafik XRD Baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan

Hasil XRD menunjukkan bahwa fase yang muncul adalah Fe dengan puncak tertinggi 2θ berada pada 44.6563.

a. Baja *Copperizing* Pendinginan *Furnace* (Annealing)

Hasil uji identifikasi fase dengan XRD untuk spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil ditunjukkan pada Gambar 4.18 berikut.



Gambar 4.18 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan *annealing*, (b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan anil



Pada hasil pengujian XRD pada spesimen uji dengan pendinginan *annealing* (Gambar 4.18(a)) menunjukkan terjadi pergeseran puncak (*peak*) tertinggi yang teridentifikasi sebagai puncak Fe. Spesimen awal tanpa perlakuan menunjukkan puncak tertinggi yang dimiliki Fe berada di 2θ yakni 44.6563. Sedangkan spesimen uji setelah dilakukan proses *copperizing* selama 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan anil berturut-turut 2θ berada di 44.5789 dan 44.6297. Pada hasil XRD spesimen uji setelah *copperizing* selama 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan anil juga muncul puncak baru yang merupakan puncak Cu (tembaga). Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat fase baru yaitu Cu pada spesimen uji yang telah *dicopperizing*. Cu membentuk fase sendiri (fase tunggal) karena dilihat dari diagram fase Fe-Cu yang tidak memungkinkan untuk terbentuknya senyawa dengan Fe.

Berdasarkan penelitian dari M. Husna Al Hasa (2007), pembentukan fase Cu merupakan proses reaksi antara Cu dan Fe yang terjadi akibat rejeksi larutan padat Fe yang melebihi kemampuan larut-padat dalam struktur α . Rejeksi ini terjadi karena kelarutan atom Cu dalam struktur fase α telah melampaui batas kelarutan yang diizinkan yakni $>0,01\%$ Cu dengan pendinginan lambat ke temperatur kamar mendekati kondisi ekuilibrium sesuai diagram fase Fe-Cu pada Gambar 2.4 (Avazkonandeh, 2009).

Ada atau tidaknya atom yang larut kedalam Fe dapat diketahui dengan melihat adanya *peak broadening* (pelebaran puncak) berdasarkan hasil XRD pada puncak tertinggi Fe (Gambar 4.18(b)). Pelebaran puncak dapat diketahui dengan menghitung nilai B berdasarkan nilai FWHM. Nilai B merupakan nilai dari FWHM hasil pengujian setelah dikurangi dengan FWHM standar. Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen *copperizing* dengan pendinginan anil ditunjukkan pada Tabel 4.2.



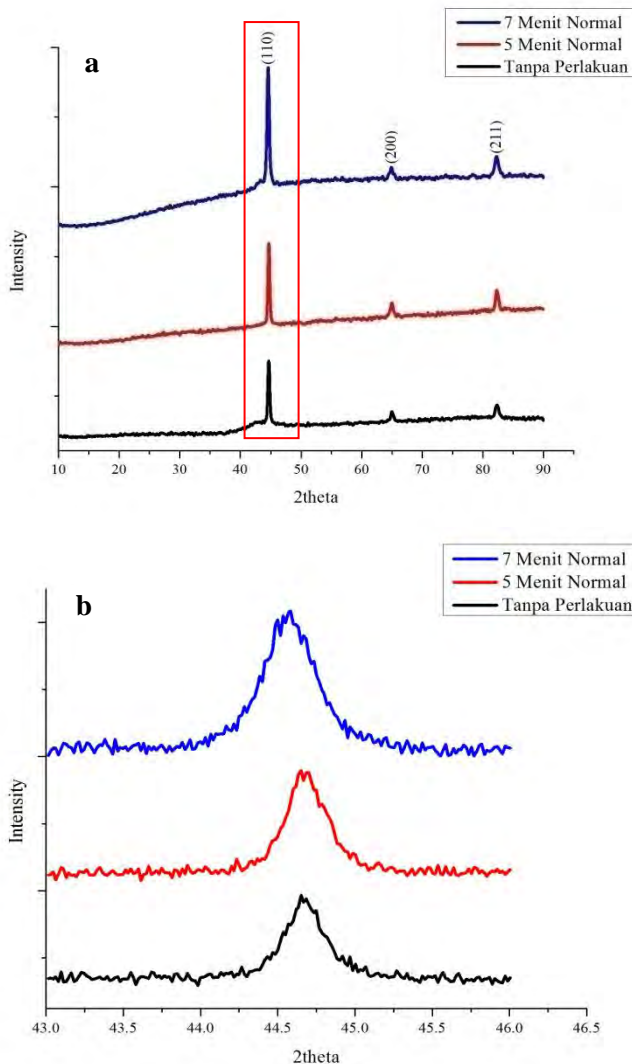
Tabel 4.2 Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 *copperizing* dengan pendinginan anil

Spesimen	2 Theta	FWHM	B (rad)
Tanpa Perlakuan	44.6563	0.0836	3.4409×10^{-4}
5 Menit Anil	44.5789	0.1004	9.0140×10^{-4}
7 Menit Anil	44.6297	0.1171	1.3826×10^{-3}

Pelebaran puncak kurva terlihat semakin besar pada setiap variasi waktu celup dengan pelebaran tertinggi pada variasi waktu celup yang lebih lama yaitu 7 menit. Hal ini mengindikasikan bahwa telah terjadi tegangan dalam (*microstrain*). Adanya *microstrain* membuktikan bahwa proses *copperizing* dengan penambahan Cu mampu memberikan energi untuk merubah parameter kisi dan struktur kristal dari spesimen *copperizing*, serta mengindikasikan pengaruh lama waktu celup terhadap transformasi fasa (Puguh Christianto, 2013).

b. Baja Copperizing Pendinginan Udara (*Normalizing*)

Hasil pengujian XRD dan hasil identifikasi fase dengan menggunakan kartu PDF untuk spesimen baja AISI 1006 tanpa perlakuan dan setelah *copperizing* dengan pendinginan normal ditunjukkan oleh Gambar 4.19.



Gambar 4.19 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan *normalizing*, (b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan normal



Pada hasil XRD pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan udara (normal) pada Gambar 4.19 tidak terlihat fase lain yang muncul selain Fe. Seluruh puncak yang muncul dari hasil XRD pada spesimen uji baik pada spesimen *copperizing* selama 5 menit maupun *copperizing* selama 7 menit menunjukkan bahwa puncak-puncak tersebut diidentifikasi merupakan puncak Fe. Sehingga dapat dikatakan bahwa fase yang lain larut didalam Fe sehingga tidak memunculkan puncak dan tidak membuat fase baru. Berdasarkan hasil uji *Optical Emmission Spectroscopy* menunjukkan bahwa kadar Cu meningkat setelah dilakukan *copperizing* selama 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan normal. Akan tetapi puncak untuk fase Cu tidak muncul pada hasil XRD, sehingga atom Cu kemungkinan larut dalam Fe. Hal ini akan dibuktikan dengan hasil dari perhitungan *microstrain* yang menjadi lebih besar.

Adanya pelebaran puncak dengan Fe pada spesimen *copperizing* pendinginan normal ditunjukkan pada Gambar 4.19(b). Untuk hasil perhitungan untuk mengetahui adanya pelebaran puncak yang menunjukkan kelarutan atom dalam Fe ditampilkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 *copperizing* dengan pendinginan normal

Spesimen	2 Theta	FWHM	B (rad)
Tanpa Perlakuan	44.6563	0.0836	3.4409×10^{-4}
5 Menit Normal	44.6594	0.2342	3.805×10^{-3}
7 Menit Normal	44.5449	0.2676	4.4225×10^{-3}

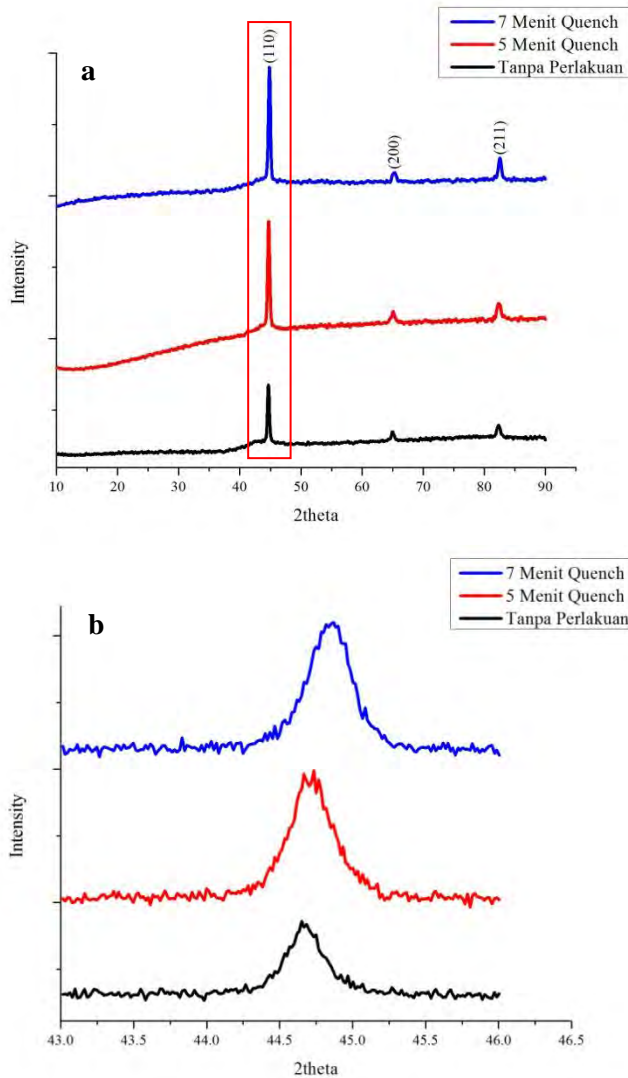
Seperti pada penelitian Puguh Christianto (2013) mengenai transformasi fase ($\alpha \rightarrow \beta$) pada *solid solution* Ti-3 at.%Al pada proses *mechanical alloying* yang mengatakan bahwa perubahan pada nilai FWHM pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* (lihat Tabel 4.3) menyatakan adanya pelebaran puncak kurva tertinggi dalam hal ini puncak Fe yang mengindikasikan terbentuknya *solid solution*. Semakin besarnya nilai FWHM, maka semakin banyaknya Cu yang masuk kedalam Fe. Pada



spesimen *copperizing* pendinginan normal terlihat bahwa nilai FWHM meningkat dibandingkan pada spesimen awal. Hal ini dapat dikatakan bahwa pada spesimen *copperizing* 5 menit pendinginan normal atom Cu berdifusi ke dalam Fe, dan menjadi semakin banyak atom Cu yang berdifusi dengan semakin lama waktu celup yakni pada spesimen *copperizing* 7 menit normal.

c. Baja *Copperizing* Pendinginan *Quenching*

Hasil pengujian XRD untuk spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* dengan pendinginan cepat media air (*quenching*) yang menunjukkan hasil identifikasi fase serta grafik yang menunjukkan adanya pelebaran puncak pada puncak tertinggi Fe ditunjukkan pada Gambar 4.20 berikut.



Gambar 4.20 (a)Perbandingan grafik hasil XRD untuk spesimen uji dengan pendinginan *quenching* (b)Perbandingan puncak tertinggi Fe pada spesimen uji dengan pendinginan *quench*



Gambar 4.20(a) yang merupakan hasil pengujian XRD untuk spesimen baja AISI 1006 tanpa perlakuan dengan spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit dan 7 menit pendinginan *quench*. menunjukkan fase yang muncul hanya fase Fe, tidak terlihat ada fase Cu yang muncul.

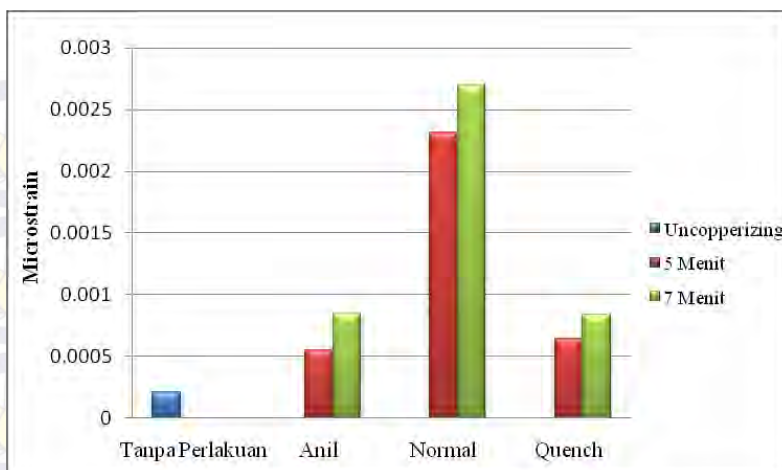
Adanya pelebaran puncak (*peak broadening*) Fe pada spesimen uji baja AISI 1006 *copperizing* pendinginan *quench* seperti yang terlihat pada Gambar 4.20(b) didapatkan dari hasil perhitungan B yang ditampilkan pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Hasil perhitungan nilai B untuk spesimen uji baja AISI 1006 *copperizing* dengan pendinginan *quench*

Spesimen	2 Theta	FWHM	B (rad)
Tanpa Perlakuan	44.6563	0.0836	3.4409×10^{-4}
5 Menit <i>Quench</i>	44.6523	0.0612	1.0512×10^{-3}
7 Menit <i>Quench</i>	44.8740	0.1171	1.3826×10^{-3}

Pada Tabel 4.4 terlihat bahwa nilai B dari hasil perhitungan FWHM pada spesimen baja AISI 1006 pendinginan *quench* membesar. Perubahan nilai FWHM menyatakan adanya *peak broadening* atau pelebaran kurva puncak difraksi. Hal tersebut mengindikasikan adanya tegangan dalam (*microstrain*) pada spesimen hasil *copperizing* dengan pendinginan *quench* sesuai dengan penelitian oleh Puguh Christianto (2013).

Untuk perbandingan nilai *microstrain* spesimen uji tiap variasi ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Perbandingan *microstrain* spesimen uji sebelum dan setelah *copperizing* berdasarkan hasil XRD

Dari hasil perhitungan *microstrain* terlihat bahwa spesimen uji setelah *copperizing* memiliki regangan yang lebih besar dibandingkan dengan regangan spesimen awal tanpa perlakuan. Hal ini mengindikasikan bahwa ada atom yang larut dalam kristal Fe sehingga menyebabkan regangan meningkat. Atom yang larut pada spesimen uji *copperizing* dengan pendinginan normal menunjukkan bahwa terdapat atom Cu yang larut didalam kristal Fe. Hal ini dibuktikan dengan *microstrain* yang semakin besar, serta pada hasil XRD tidak menunjukkan adanya puncak Cu, akan tetapi dari hasil *spectroscopy* menunjukkan bahwa kadar Cu meningkat. Ini menandakan bahwa atom Cu larut didalam Fe, sehingga tidak terbaca pada hasil pengujian XRD. Hal ini diperkuat dengan penelitian S. K. Ghosh et al (2009) yang mengatakan bahwa pada baja *microalloyed*, penambahan Cu memberi efek pada ekspansi area non kristalisasi dengan efek *solute drag*.

Terlihat bahwa pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* dengan pendinginan normal memberikan nilai FWHM yang besar dibandingkan dengan spesimen *copperizing* variasi laju



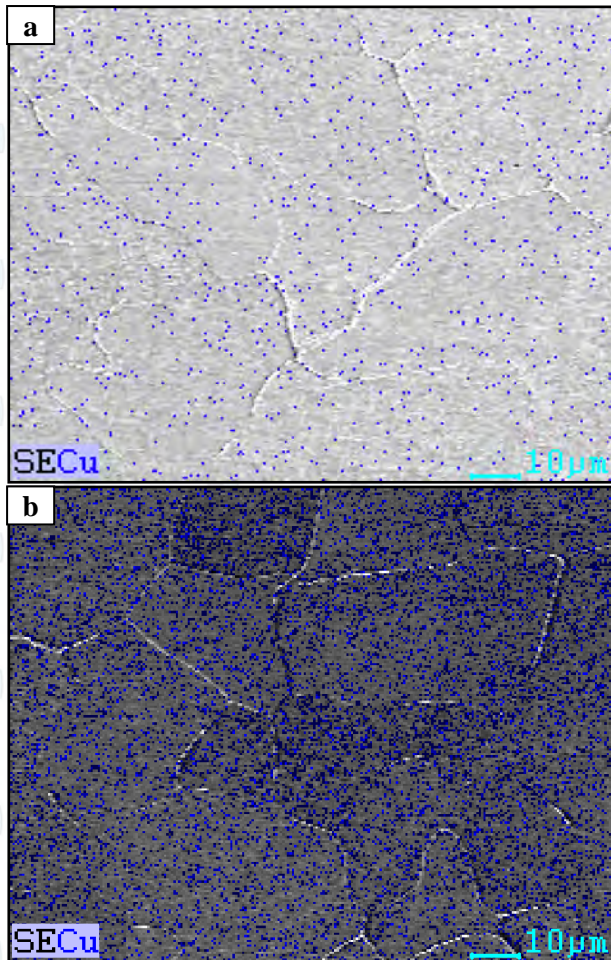
pendinginan yang lain yakni anil dan *quench*. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan pendinginan normal lebih efektif melarutkan Cu kedalam baja sebab pada penelitian Puguh Christianto (2013) menyatakan bahwa semakin besarnya nilai FWHM, maka semakin banyak Cu yang masuk kedalam Fe.

IV.5 Hasil Pengujian SEM EDX

Pengujian *Scanning Electron Microscopy* dilakukan untuk mengetahui topografi dari permukaan spesimen uji setelah dilakukan proses *copperizing*, serta untuk mengetahui persebaran Cu yang masuk kedalam Fe. Pada pengujian SEM ini yang digunakan adalah *secondary electron*, dan juga menggunakan EDS untuk menampilkan hasil *mapping*.

a. Baja AISI 1006 Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan *Furnace (Annealing)*

Gambar hasil *mapping* tembaga pada spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* 5 menit dengan pendinginan anil ditunjukkan pada Gambar 4.22 berikut.



Gambar 4.22 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX perbesaran 1000x pada spesimen baja AISI 1006 copperizing pendinginan anil di bagian tengah waktu celup (a) 5 menit, (b) 7 menit

Komposisi fase hasil uji SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan anil ditunjukkan pada Tabel 4.5.



Tabel 4.5 Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* dengan pendinginan anil

Spesimen	Element (Wt%)			
	CK	FeK	Cuk	OK
5' Anil	04.65	93.48	01.86	-
7' Anil	05.55	87.99	03.18	03.28

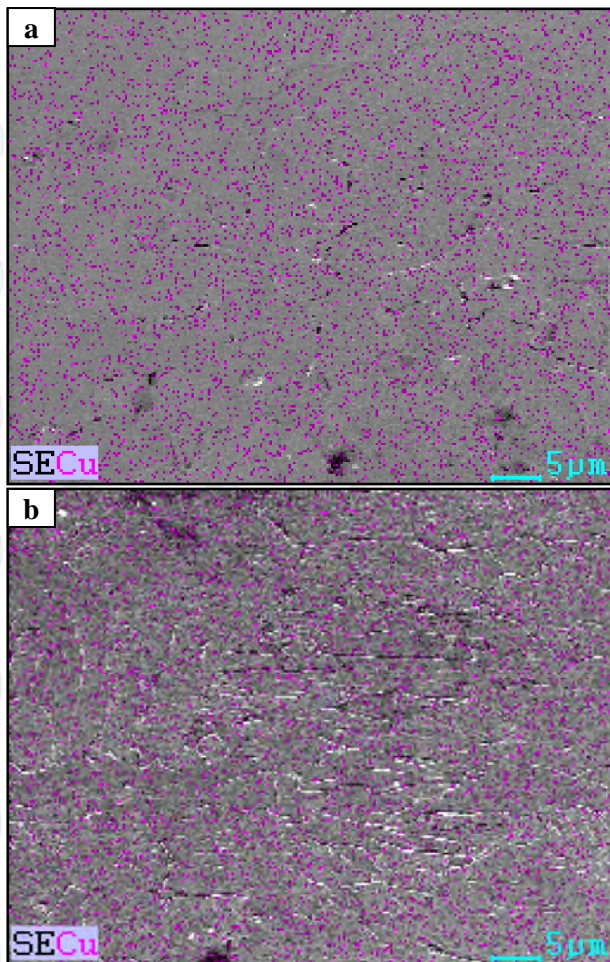
Hasil *mapping* Cu dari hasil pengujian SEM EDX pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit dengan pendinginan anil pada Gambar 4.22 menunjukkan persebaran Cu dibagian tengah merata diseluruh permukaan baik di batas butir maupun di butirannya. Hal ini sesuai dengan penelitian Yourong Xu (1993) yang menjelaskan bahwa Cu dapat berdifusi di sepanjang batas butir ferit dan di butir ferit. Adanya Cu yang masuk ke dalam baja juga dibuktikan dengan hasil uji OES yang menunjukkan bahwa kadar Cu meningkat setelah *copperizing*.

Pada Gambar 4.22(b) juga menunjukkan bahwa pada hasil *mapping* baja *copperizing* 7 menit anil bagian tengah terlihat bahwa Cu tersebar diseluruh permukaan baja baik di batas butir maupun di butirannya.

Jika dibandingkan dari hasil persebaran Cu terlihat bahwa pada spesimen *copperizing* 5 menit pendinginan anil menunjukkan bahwa Cu yang tersebar dalam baja lebih sedikit daripada persebaran Cu pada spesimen *copperizing* 7 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu celup akan memberikan waktu yang lebih banyak untuk Cu agar dapat masuk ke dalam Fe sehingga kadar Cu lebih tinggi. Ini juga dibuktikan dengan hasil OES yang menunjukkan bahwa kadar Cu meningkat.

b. Baja AISI 1006 Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan Udara (*Normalizing*)

Hasil pengujian SEM EDX yang menunjukkan hasil *mapping* persebaran tembaga pada spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan udara (normal) ditunjukkan oleh Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX perbesaran 1000x pada spesimen baja AISI 1006 copperizing pendinginan normal di bagian tengah waktu celup (a)5 menit, (b)7 menit

Gambar hasil *mapping* tembaga baja AISI 1006 *copperizing* 5 menit pendinginan normal di bagian tengah yang ditunjukkan oleh Gambar 4.23(a) menunjukkan persebaran Cu merata di



seluruh permukaan baja. Hasil *mapping* tembaga pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan normal di bagian tengah juga menunjukkan persebaran tembaga yang merata diseluruh permukaan baja seperti Gambar 4.23(b). Jika dibandingkan terlihat bahwa Cu yang tersebar lebih banyak pada spesimen AISI 1006 *copperizing* 7 menit daripada spesimen *copperizing* 5 menit

Komposisi fase hasil uji SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* waktu celup 5 menit dan 7 menit dengan pendinginan normal ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut.

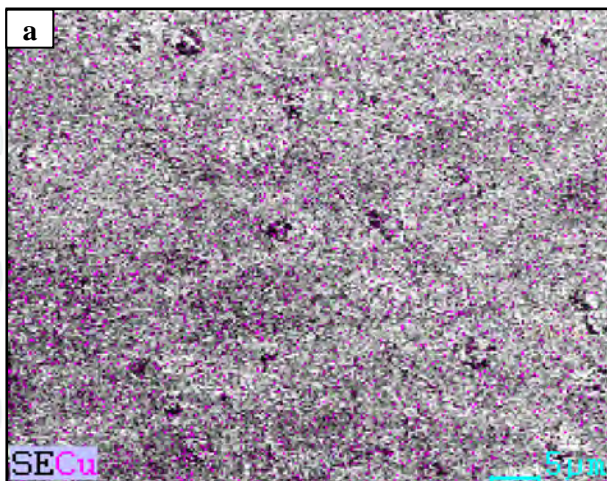
Tabel 4.6 Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* waktu celup 5 menit dan 7 menit pendinginan normal

Spesimen	Element (Wt%)				
	CK	OK	AlK	FeK	CuK
5' Normal	04.28	02.52	02.10	88.59	02.51
7' Normal	04.52	04.22	02.05	85.40	03.81

Dari hasil komposisi terlihat bahwa memang pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* mengandung Cu yang lebih besar daripada spesimen *copperizing* 5 menit. Ini mengindikasikan Cu yang berdifusi lebih banyak dengan waktu celup yang lebih lama.

c. Baja AISI 1006 Setelah *Copperizing* dengan Pendinginan Cepat Media Air (*Quenching*)

Persebaran Cu yang masuk ke dalam spesimen baja AISI 1006 setelah *copperizing* selama 7 menit dengan pendinginan cepat media air (*quench*) berdasarkan hasil uji SEM EDX ditunjukkan pada Gambar 4.24 berikut.



Gambar 4.24 Gambar hasil *mapping* tembaga (Cu) menggunakan SEM EDX pada spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *quench* di bagian tengah perbesaran 1000x

Komposisi fase hasil uji SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit dengan pendinginan *quench* ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Komposisi fase hasil SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *quench*

Spesimen	Element (Wt%)				
	CK	OK	AlK	FeK	CuK
7' <i>quench</i>	01.49	01.76	00.77	93.99	01.99

Berdasarkan hasil *mapping* pengujian SEM EDX untuk spesimen baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit dengan pendinginan *quench* bagian tengah yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 menunjukkan bahwa Cu tersebar merata diseluruh permukaan baja. Dari hasil komposisi SEM EDX menunjukkan Cu yang masuk pada spesimen *copperizing* 7 menit lebih sedikit dibandingkan dengan spesimen *copperizing* 7 menit dengan pendinginan anil dan normal.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan hasil analisis data yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh waktu celup dan laju pendinginan pada proses *copperizing* menunjukkan bahwa semakin lama waktu celup dan laju pendinginan, semakin banyak kadar Cu yang berdifusi yang menyebabkan luas ukuran butir mengecil yaitu dengan kadar Cu tertinggi yang berdifusi sebesar 0.277% pada baja AISI 1006 *copperizing* 7 menit pendinginan *annealing* yang menyebabkan luas ukuran butir mengecil hingga sebesar 11114.6622 μm^2 .
2. Laju pendinginan juga memberikan pengaruh perubahan struktur mikro pada proses *copperizing* dimana pada pendinginan anil memperlihatkan fase ferit dan pada pendinginan normal memperlihatkan fase poligonal ferit, sedangkan pada pendinginan *quench* memperlihatkan fasa granular bainit.
3. Tembaga yang berdifusi ke dalam baja AISI 1006 setelah proses *copperizing* membentuk fase tunggal Cu dan tersebar di seluruh batas butir dan butir Fe. Pada spesimen *copperizing* dengan pendinginan normal dan *quench* menunjukkan bahwa Cu larut seluruhnya didalam kristal Fe membentuk *solid solution*.

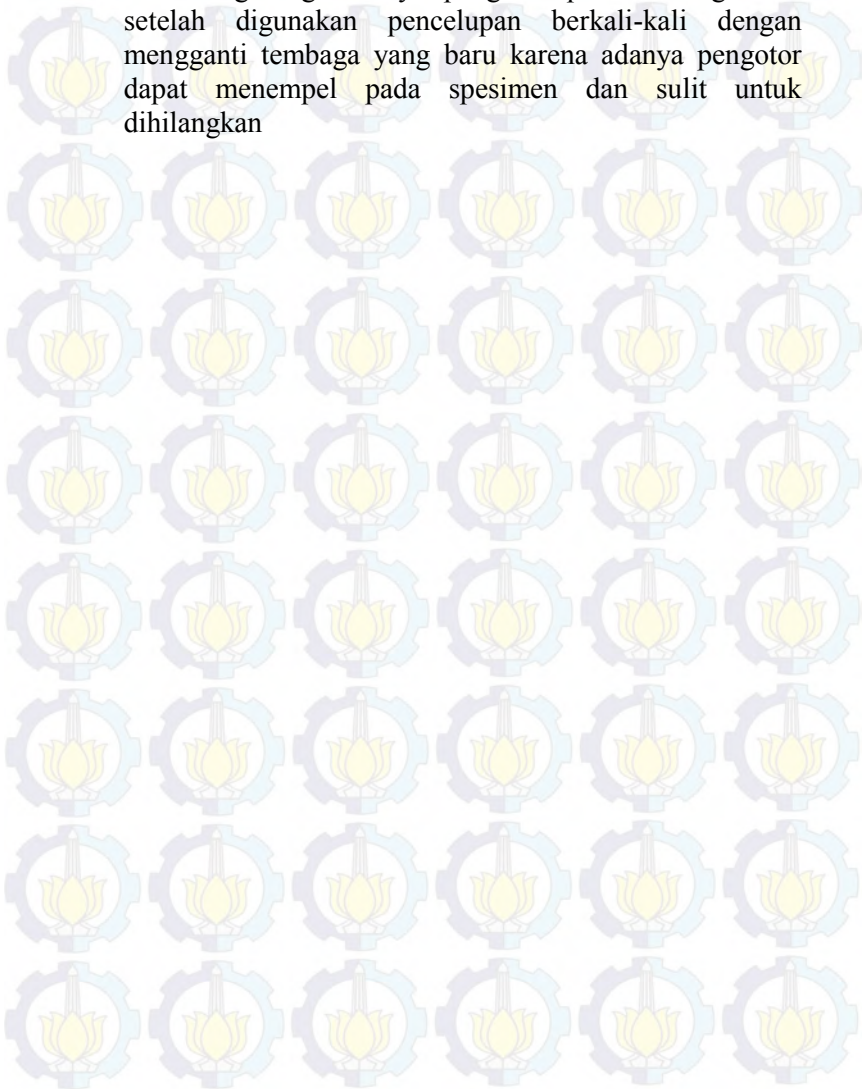
V.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dipertimbangkan terkait metode *copperizing* ini untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Meminimalisir terbentuknya oksida pada permukaan spesimen ketika proses *pre heat* agar dapat memaksimalkan proses difusi tembaga saat proses *copperizing*



2. Kondisi tembaga saat pencelupan harus benar-benar cair dan mengurangi adanya pengotor pada tembaga cair setelah digunakan pencelupan berkali-kali dengan mengganti tembaga yang baru karena adanya pengotor dapat menempel pada spesimen dan sulit untuk dihilangkan



DAFTAR PUSTAKA

- Anand, M. S.; R. P. Agarwala. 1966. *Diffusion of Copper in Iron*. Bombay: Journal of Applied Physics Volume 37, Number 11
- ASM International. 2001. *High-Strength Low-Alloy Steel. Alloying: Understanding the Basics* (#06117G)
- ASTM International. 2000. *Standard Specification for General Requirements for Wire Rods and Coarse Round Wire, Carbon Steel*. Designation: A510-00
- Banadkouki, S. S. Ghasemi; D. P. Dunne. 2006. *Formation of Ferritic Product During Continuous Cooling of a Cu-bearing HSLA Steel*. ISIJ International, Vol. 46, No. 5, pp. 759-768.
- Butrymowicz, Daniel B.; John R. Manning; Michael E. Read. 1976. *Diffusion in Copper and Copper Alloys Part IV. Diffusion Systems Involving Elements of Group VIII*. Washington D.C.: J. Phys. Chem., Ref. Data, Vol. 5, No. 1
- Callister, William D., 2007. *Materials Science and Engineering An Introduction Seventh Edition*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Christianto, Puguh; Hariyati Purwaningsih. 2013. *Analisa Rietveld terhadap Transformasi Fasa ($\alpha \rightarrow \beta$) pada Solid Solution Ti-3 at.% Al pada Proses Mechanical Alloying dengan Variasi Milling Time*. JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 2, No. 1, ISSN: 2337-3539
- Davis, Joseph R. 2001. *ASM Specialty Handbook Copper and Copper Alloys*. United States of America: ASM International
- Durand, Madeleine; Charre. 2003. *Microstructure of Steels and Cast Irons*. Paris: Springer
- ES-Souni M, Beaven EA, Evans GM. *Microstructure of Copper-Bearing C-Mn Weld Metal: as-Welded and Stress-Relieved States*. Mater Sci Eng A 1990;130:173-84

- Elwazri, A. M.; A. Fatehi; J. Calvo; D. Bai; S. Yue. 2008. *Analysis of Copper Effect on Microstructures and Mechanical Properties in Microalloyed Steels*. ISIJ International, Vol. 48, No. 1, pp. 107-113
- Gharavol, M.H. Avazkonandeh; M. Haddad Sabzevar; A. Haerian. 2009. *Effect of Copper Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposits*. Material and Design 30, 1902-1912: Elsevier Ltd.
- Ghosh, S. K.; A. Haldar; P. P. Chattopadhyay. 2009. *The Influence of Copper Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thermomechanically Processed Microalloyed Steels*. 2009. J Mater Sci 44:580-590: Springer Science
- Groisman, Alec. 2010. *Corrosion for Everybody*. New York: Springer
- Hu, Wei. 2008. *Data-driven Metallurgical Design for High Strength Low Alloy (HSLA) Steel*. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University
- Jaypuria, Sanjib Kumar. 2008. *Heat Treatment of Low Carbon Steel*. National Institute of Technology Rourkela-769008
- Khurmi, R.S.; J.K. Gupta. 2005. *A Textbook of Machine Design*. New Delhi: Eurasia Publishing House (PVT.) LTD.
- Klebl, Wolfram; Friedrich Schatz; Harry Staschewski; Gerhard Ziemek. 1975. *US 3894675 Patent Copper Clad Steel*. United States Patent
- Krauss, George. 2015. *Steels: Processing, Structure, and Performance, Second Edition*. United States of Amerika: ASM International
- Kundig, K.J.A. & Cowie, J.G., 2006. Chapter 4: Copper and Copper Alloys. In Kutz, M. *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume 1, Third Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. pp.117-220.

- Llewellyn, D. T. 1995. *Steels Metallurgy and Applications*. Oxford: Butterworth-heinemann Ltd
- Moline, K.; J. Scott; Devasco International; A.N. Lasseigne; S. Liu. 2002. *Effect of Copper in High Strength Low Alloy Steel*. Colorado: School of Mines
- Molleda, F.; J. Mora; J.R. Molleda; E. Carrillo; E. Mora; B.G. Mellor. 2008. *Copper Coating of Carbon Steel by A Furnace Brazing Process Using Brass as the Braze*. Material Characterization 59, 613-617
- Ruddle, G.E., 2002. *Effects of Residuals in Carbon Steels*. Pennsylvania: American Iron and Steel Institute.
- Savage, W. F.; E. F. Nippes; and R.P. Stanton. 1978. *Intergranular Attack of Steel by Molten Copper*. Welding Research Supplement
- Satyendra. 2014. *Copper in Steels*. Ispat Digest
- Seblin.B; Jahazeeah.Y; dkk.Steel. Material Science-MECH 2104
- Suherman, Wahid. 2001. *Perlakuan Panas*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- Syarif, Junaidi; Zainuddin Sajuri. 2010.*Effect of Copper Addition on Grain Refinement of Austenite in Fe-8wt.%Ni-(0-3)wt.%Cu Alloy*. Sains Malaysiana 39(6): 999-1006
- Takaki, Setuo; Massaki Fujioka; Shuji Aihara; dkk. 2004. *Effect of Copper on Tensile Properties and Grain-Refinemenet of Steel and Its Relation to Precipitation Behavior*. Materials Transactions, Vol. 45, No. 7 pp. 2239 to 2244. The Japan Institute of Metals
- Total Materia. 2006. *Control of High Strength Low Alloy (HSLA) Steel Properties*
- Wilson, A. D.; E. G. Hamburg, dkk. 1987. *Properties and Microstructures of Copper Precipitation Aged Plate Steels*. 8811-006 USA
- Xu, Yourong; Deying Wang; Qi Jin; Yijian Zhou. 1993. *Diffusion Behaviour of Fe-Cu Interface of Copper Brazed Double-wall Steel Tubes*. J.Mater.Sci.Technol., Vol.9



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

I. Perhitungan Ukuran Butir (Metode Heyn Intercept)

1. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 Annealing Uncopperizing



**Gambar 1. Struktur Mikro AISI 1006 Annealing Uncopperizing
Perbesaran 500x**

$$N = 3$$

$$D = 75 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3.14$$

Keterangan:

N = Jumlah perpotongan garis lingkaran dengan batas butir

D = Diameter lingkaran

M = Perbesaran gambar

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3.14 \times 75}{500}$$

$$K_{ll} = 0.471 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{3}{0.471}$$

$$P_L = 6.3694$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{6.3694}$$

$$L_3 = 0.1570$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.1570) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-0.8040) - 3.298\}$$

$$G = \{5.3438 - 3.298\}$$

$$G = 2.0458$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 Annealing Uncopperizing adalah 2.0458. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{2.0458 - 2.0}{2.5 - 2.0} = \frac{x - 32258}{22810 - 32258}$$

$$\frac{0.0458}{0.5} = \frac{x - 32258}{-9448}$$

$$-865.4368 = x - 32258$$

$$x = 31392.5632 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Annealing Uncopperizing adalah $31392.5632 \mu\text{m}^2$

2. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 Normalizing Uncopperizing



**Gambar 2. Struktur Mikro AISI 1006 Normalizing Uncopperizing
Perbesaran 500x**

N = 9
D = 80 mm
M = 500
 $\pi = 3.14$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{II} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{II} = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$K_{II} = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{9}{0.5024}$$

$$P_L = 17.9140$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{17.9140}$$

$$L_3 = 0.0558$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0558) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.2534) - 3.298\}$$

$$G = \{8.3297 - 3.298\}$$

$$G = 5.0317$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 Normalizing Uncopperizing adalah 5.0317. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5.0317 - 5.0}{5.5 - 5.0} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

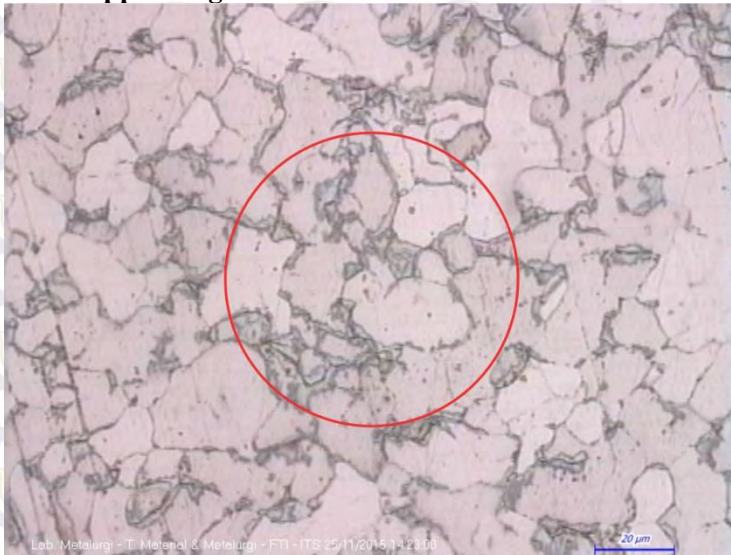
$$\frac{0.0317}{0.5} = \frac{x - 4032}{-1181}$$

$$-74.8754 = x - 4032$$

$$x = 3957.1246 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Normalizing Uncopperizing adalah $3957.1246 \mu\text{m}^2$

3. Spesimen Kontrol Baja AISI 1006 Quenching Uncopperizing



Gambar 3. Struktur Mikro AISI 1006 Quenching Uncopperizing Perbesaran 500x

$$N = 14$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$Kll = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{14}{0.5024}$$

$$P_L = 27.8662$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{27.8662}$$

$$L_3 = 0.0359$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0359) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.4449) - 3.298\}$$

$$G = \{9.6024 - 3.298\}$$

$$G = 6.3044$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 Quenching Uncopperizing adalah 6.3044. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6.3044 - 6.0}{6.5 - 6.0} = \frac{x - 2016}{1426 - 2016}$$

$$\frac{0.3044}{0.5} = \frac{x - 2016}{-590}$$

$$-359.192 = x - 2016$$

$$x = 1656.808 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diperoleh bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Quenching Uncopperizing adalah $1656.808 \mu\text{m}^2$

4. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Annealing

a. 5 Menit Annealing Bagian Tengah



Gambar 4. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Annealing Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x

$$N = 4$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$Kll = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{4}{0.5024}$$

$$P_L = 7.9618$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{7.9618}$$

$$L_3 = 0.1256$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.1256) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-0.9010) - 3.298\}$$

$$G = \{5.9878 - 3.298\}$$

$$G = 2.6898$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan annealing bagian tengah adalah 2.6898. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{2.6898 - 2.5}{3.0 - 2.5} = \frac{x - 22810}{16129 - 22810}$$

$$\frac{0.1895}{0.5} = \frac{x - 22810}{-6681}$$

$$-2532.099 = x - 22810$$

$$x = 20277.901 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 5 menit pendinginan annealing bagian tengah adalah $20277.901 \mu\text{m}^2$.

b. 5 Menit Annealing Bagian Tepi



Gambar 5. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Annealing Pada Bagian Tepi Perbesaran 200x

$$N = 7$$

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$M = 200$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3.14 \times 50}{200}$$

$$K_{ll} = 0.785 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{7}{0.785}$$

$$P_L = 8.9172$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{8.9172}$$

$$L_3 = 0.1121$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.1121) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-0.9504) - 3.298\}$$

$$G = \{6.3161 - 3.298\}$$

$$G = 3.0181$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan annealing bagian tepi adalah 3.0181. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{3.0181 - 3.0}{3.5 - 3.0} = \frac{x - 16129}{11405 - 16129}$$

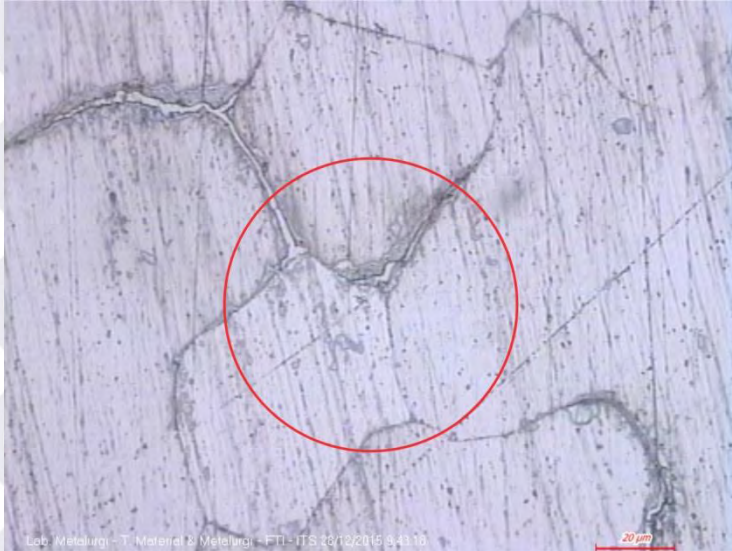
$$\frac{0.0181}{0.5} = \frac{x - 16129}{-4724}$$

$$-171.0088 = x - 16129$$

$$x = 15957.9912 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 5 menit pendinginan annealing bagian tepi adalah $15957.9912 \mu\text{m}^2$.

**5. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit
Pendinginan Annealing
a. 7 Menit Annealing Bagian Tengah**



**Gambar 6. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit
Pendinginan Annealing Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x**

$$\begin{aligned}N &= 5 \\D &= 80 \text{ mm} \\M &= 500 \\ \pi &= 3.14\end{aligned}$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$K_{ll} = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{5}{0.5024}$$

$$P_L = 9.9522$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{9.9522}$$

$$L_3 = 0.1005$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.1005) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-0.9978) - 3.298\}$$

$$G = \{6.6311 - 3.298\}$$

$$G = 3.3331$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 7 menit pendinginan annealing bagian tengah adalah 3.3331. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{3.3331 - 3.0}{3.5 - 3.0} = \frac{x - 16129}{11405 - 16129}$$

$$\frac{0.3331}{0.5} = \frac{x - 16129}{-4724}$$

$$-3147.1288 = x - 16129$$

$$x = 12981.8712 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan annealing bagian tengah adalah $12981.8712 \mu\text{m}^2$.

b. 7 Menit Annealing Bagian Tepi



Gambar 7. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Annealing Pada Bagian Tepi Perbesaran 500x

$$N = 8$$

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$M = 200$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 50}{200}$$

$$Kll = 0.785 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{8}{0.785}$$

$$P_L = 10.1911$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{10.1911}$$

$$L_3 = 0.0981$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0981) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.0083) - 3.298\}$$

$$G = \{6.7009 - 3.298\}$$

$$G = 3.4029$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 7 menit pendinginan annealing bagian tepi adalah 3.4029. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{3.4029 - 3.0}{3.5 - 3.0} = \frac{x - 16129}{11405 - 16129}$$

$$\frac{0.4029}{0.5} = \frac{x - 16129}{-4724}$$

$$-3806.5992 = x - 16129$$

$$x = 12322.4008 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan annealing bagian tepi adalah $12322.4008 \mu\text{m}^2$.

6. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit
Pendinginan Normalizing
a. 5 Menit Normalizing Bagian Tengah



Gambar 8. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit
Pendinginan Normalizing Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x

$$N = 10$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$Kll = 0,5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{10}{0.5024}$$

$$P_L = 19.9045$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{19.9045}$$

$$L_3 = 0.0502$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0502) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.2993) - 3.298\}$$

$$G = \{8.6348 - 3.298\}$$

$$G = 5.3368$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan normal bagian tengah adalah 5.3368. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5.3368 - 5.0}{5.5 - 5.0} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

$$\frac{0.3368}{0.5} = \frac{x - 4032}{-1181}$$

$$-397.7608 = x - 4032$$

$$x = 3634.2392 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diperoleh bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 5 menit pendinginan normalizing bagian tengah adalah $3634.2392 \mu\text{m}^2$

b. 5 Menit Normalizing Bagian Tepi



Gambar 9. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Annealing Pada Bagian Tepi Perbesaran 200x

$$N = 26$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 200$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 80}{200}$$

$$Kll = 1.256 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{26}{1.256}$$

$$P_L = 20.7006$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{20.7006}$$

$$L_3 = 0.0483$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0483) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.3161) - 3.298\}$$

$$G = \{8.7464 - 3.298\}$$

$$G = 5.4484$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan normalizing bagian tepi adalah 5.4484. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5.4484 - 5.0}{5.5 - 5.0} = \frac{x - 4032}{2851 - 4032}$$

$$\frac{0.4484}{0.5} = \frac{x - 4032}{-1181}$$

$$-1059.1208 = x - 4032$$

$$x = 2972.8792 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 5 menit pendinginan normalizing bagian tepi adalah $2972.8792 \mu\text{m}^2$.

7. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Normalizing
a. 7 Menit Normalizing Bagian Tengah



Gambar 10. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Normalizing Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x

N = 11
D = 80 mm
M = 500
 $\pi = 3,14$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3,14 \times 80}{500}$$

$$K_{ll} = 0,5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{11}{0.5024}$$

$$P_L = 21.8949$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{21.8949}$$

$$L_3 = 0.0457$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0457) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.3401) - 3.298\}$$

$$G = \{8.9059 - 3.298\}$$

$$G = 5.6079$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 7 menit pendinginan normal bagian tengah adalah 5.6079. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5.6079 - 5.5}{6.0 - 5.5} = \frac{x - 2851}{2016 - 2851}$$

$$\frac{0.1079}{0.5} = \frac{x - 2851}{-835}$$

$$-180.193 = x - 2851$$

$$x = 2670.807 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diperoleh bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan normalizing bagian tengah adalah $2670.807 \mu\text{m}^2$

b. 7 Menit Normalizing Bagian Tepi



Gambar 11. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Normalizing Pada Bagian Tepi Perbesaran 500x

N = 18
D = 50 mm
M = 200
 $\pi = 3.14$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 50}{200}$$

$$Kll = 0.785 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{18}{0.785}$$

$$P_L = 22.9299$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{22.9299}$$

$$L_3 = 0.0436$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0436) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.3615) - 3.298\}$$

$$G = \{9.0481 - 3.298\}$$

$$G = 5.0158$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan normalizing bagian tepi adalah 5.7435. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{5.7435 - 5.5}{6.0 - 5.5} = \frac{x - 2851}{2016 - 2851}$$

$$\frac{0.2435}{0.5} = \frac{x - 2851}{-835}$$

$$-406.645 = x - 2851$$

$$x = 2444.355 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan normalizing bagian tepi adalah $2444.355 \mu\text{m}^2$.

8. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Quenching

a. 5 Menit Quenching Bagian Tengah



Gambar 12. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Quenching Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x

$$N = 15$$

$$D = 80 \text{ mm}$$

$$M = 500$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$Kll = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{15}{0.5024}$$

$$P_L = 29.8567$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{29.8567}$$

$$L_3 = 0.0335$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0335) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.4750) - 3.298\}$$

$$G = \{9.8024 - 3.298\}$$

$$G = 6.5044$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan cepat media air (quench) di bagian tengah adalah 6,5044. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6.5044 - 6.5}{6.5 - 6.0} = \frac{x - 1426}{1426 - 2016}$$

$$\frac{0.0044}{0.5} = \frac{x - 1426}{-590}$$

$$-5.192 = x - 1426$$

$$x = 1420.808 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diperoleh bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 5 menit pendinginan quenching bagian tengah adalah $1420.808 \mu\text{m}^2$

b. 5 Menit Quenching Bagian Tepi



Gambar 13. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Quenching Pada Bagian Tepi Perbesaran 200x

$$N = 24$$

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$M = 200$$

$$\pi = 3.14$$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3.14 \times 50}{200}$$

$$K_{ll} = 0.785 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{K_{ll}}$$

$$P_L = \frac{24}{0.785}$$

$$P_L = 30.5732$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{30.5732}$$

$$L_3 = 0.0327$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0327) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.4855) - 3.298\}$$

$$G = \{9.8722 - 3.298\}$$

$$G = 6.5742$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 5 menit pendinginan quenching bagian tepi adalah 6.5742. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6.5742 - 6.5}{7.0 - 6.5} = \frac{x - 1426}{1008 - 1426}$$

$$\frac{0.0742}{0.5} = \frac{x - 1426}{-418}$$

$$-62.0312 = x - 1426$$

$$x = 1363.9688 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan normalizing bagian tepi adalah $1363.9688 \mu\text{m}^2$.

9. Spesimen Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Quenching

a. 7 Menit Quenching Bagian Tengah



Gambar 14. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Quenching Pada Bagian Tengah Perbesaran 500x

N = 17
D = 80 mm
M = 500
 $\pi = 3.14$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$K_{ll} = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$K_{ll} = \frac{3.14 \times 80}{500}$$

$$K_{ll} = 0.5024 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{KII}$$

$$P_L = \frac{17}{0.5024}$$

$$P_L = 33.8376$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{33.8276}$$

$$L_3 = 0.0295$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0295) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.5302) - 3.298\}$$

$$G = \{10.1693 - 3.298\}$$

$$G = 6.8713$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 7 menit pendinginan cepat media air (quench) di bagian tengah adalah 6,8713. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{6.8713 - 6.5}{6.5 - 6.0} = \frac{x - 1426}{1426 - 2016}$$

$$\frac{0.3713}{0.5} = \frac{x - 1426}{-590}$$

$$-438.134 = x - 1426$$

$$x = 987.866 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diperoleh bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan quenching bagian tengah adalah $987.866 \mu\text{m}^2$.

b. 7 Menit Quenching Bagian Tepi



Gambar 15. Struktur Mikro AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Quenching Pada Bagian Tepi Perbesaran 200x

N = 29
D = 50 mm
M = 200
 $\pi = 3.14$

- Menghitung Keliling Lingkaran Sebenarnya

$$Kll = \frac{\pi \times D}{M}$$

$$Kll = \frac{3.14 \times 50}{200}$$

$$Kll = 0.785 \text{ mm}$$

- Menghitung P_L atau N

$$P_L = \frac{N}{Kll}$$

$$P_L = \frac{29}{0.785}$$

$$P_L = 36.9427$$

- Menentukan Nilai L_3

$$L_3 = \frac{1}{P_L}$$

$$L_3 = \frac{1}{36.9427}$$

$$L_3 = 0.0271$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} L_3) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (\log_{10} 0.0271) - 3.298\}$$

$$G = \{-6.6457 (-1.5670) - 3.298\}$$

$$G = \{10.4138 - 3.298\}$$

$$G = 7.1158$$

Dari hasil perhitungan diketahui nomer grain size baja AISI 1006 copperizing 7 menit pendinginan quenching bagian tepi adalah 7.1158. Berdasarkan ASTM E112, dapat diperoleh luas grain size sebagai berikut:

Interpolasi:

$$\frac{7.1158 - 7.0}{7.5 - 7.0} = \frac{x - 1008}{713 - 1008}$$

$$\frac{0.1158}{0.5} = \frac{x - 1008}{-295}$$

$$-68.322 = x - 1008$$

$$x = 939.678 \mu\text{m}^2$$

Dari hasil perhitungan grain size dan interpolasi, diketahui bahwa luas grain size rata-rata untuk baja AISI 1006 Copperizing 7 menit pendinginan quenching bagian tepi adalah $939.678 \mu\text{m}^2$.

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	N_A Grains/Unit Area No./in. ² at 100X	A Average Grain Area mm ² at 1X	\bar{A} Average Grain Area mm ²	\bar{D} Average Diameter mm	\bar{T} Mean Intercept mm	\bar{L}_T mm	N_L No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	25064	0.5080	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3692	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	0.0951	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	0.0800	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	0.0673	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	0.0566	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	0.0476	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	0.0400	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	0.0336	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	0.0283	28.3
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	0.0238	23.8
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	0.0200	20.0
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	0.0168	16.8
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	0.0141	14.1
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	0.0119	11.9
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	0.0100	10.0
10.5	724.08	11233.2	0.000089	89.1	0.0094	0.0084	8.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	0.0071	7.1
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	0.0060	6.0
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	0.0050	5.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	0.0042	4.2
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	0.0035	3.5
13.5	5792.62	89765.8	0.000011	11.1	0.0033	0.0030	3.0
14.0	8192.00	128976.3	0.000008	7.9	0.0028	0.0025	2.5

II. Analisis Hasil XRD

1. Baja AISI 1006 Tanpa Perlakuan

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6563	487.49	0.0836	2.02926	100.00
64.9553	68.47	0.2007	1.43572	14.04
82.3476	73.89	0.5353	1.17102	15.16

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6563	87-0721	44.677	Fe	110	0.0836
82.3476	87-0721	82.342	Fe	211	
64.9553	87-0721	65.028	Fe	200	

Perhitungan *Microstrain*

$$B_m = 0.0836 \times \pi / 180 = 0.00146 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00146^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = |-1.184 \times 10^{-7}|^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 3.4409 \times 10^{-4}$$

$$B = 4\epsilon \tan\theta$$

$$3.4409 \times 10^{-4} = 4\epsilon \tan 22.32815$$

$$\epsilon = 2.0945 \times 10^{-4}$$

2. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Annealing

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.6730	49.59	0.5353	2.11886	13.66
44.5789	362.95	0.1004	2.03260	100.00
50.4454	23.45	0.5353	1.80913	6.46
65.1319	47.46	0.2007	1.43225	13.08
78.9949	23.09	0.4015	1.21208	6.36
82.2336	48.70	0.5353	1.17236	13.42

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.5789	87-0721	44.677	Fe	110	0.1004
42.6730	85-1326	43.317	Cu	111	
82.2336	87-0721	82.342	Fe	211	0.5353
65.1319	87-0721	65.028	Fe	200	0.2007
50.4454	85-1326	50.449	Cu	200	
78.9949	85-0871	78.804	Cu	140	

Perhitungan Microstrain

$$B_m = 0.1004 \times \pi / 180 = 0.00175 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00175^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 9.014 \times 10^{-4}$$

$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

$$9.014 \times 10^{-4} = 4\varepsilon \tan 22.28945$$

$$\varepsilon = 5.4975 \times 10^{-4}$$

3. Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Annealing

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3052	228.71	0.1338	2.08939	19.53
44.6297	1171.11	0.1171	2.03041	100.00
50.3757	45.52	0.4015	1.81146	3.89
64.9533	87.06	0.3346	1.43576	7.43
82.3288	157.47	0.3346	1.17124	13.45

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6297	87-0721	44.677	Fe	110	0.1171
43.3052	85-1326	43.317	Cu	111	
82.3288	87-0721	82.342	Fe	211	
64.9533	87-0721	65.028	Fe	200	
50.3757	04.0836	50.431	Cu	200	

Perhitungan *Microstrain*

$$B_m = 0.1171 \times \pi / 180 = 0.00204 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00204^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 1.3826 \times 10^{-3}$$

$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

$$1.3826 \times 10^{-3} = 4\varepsilon \tan 22.31485$$

$$\varepsilon = 8.4216 \times 10^{-4}$$

4. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Normalizing

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.1936	9.85	0.2676	8.67797	1.68
44.6594	585.40	0.2342	2.02913	100.00
64.9733	92.37	0.2676	1.43536	15.78
82.2498	124.25	0.3346	1.17217	21.22

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6594	87-0721	44.677	Fe	110	0.2342
82.2498	87-0721	82.342	Fe	211	
64.9733	87-0721	65.028	Fe	200	

Perhitungan Microstrain

$$B_m = 0.2342 \times \pi / 180 = 0.00409 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00409^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 3.805 \times 10^{-3}$$

$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

$$3.805 \times 10^{-3} = 4\varepsilon \tan 22.3297$$

$$\varepsilon = 2.316 \times 10^{-3}$$

5. Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Normalizing

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.5449	775.32	0.2676	2.03408	100.00
64.9043	84.89	0.2007	1.43672	10.95
82.2052	129.10	0.4015	1.17269	16.65

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.5449	87-0721	44.677	Fe	110	0.2676
82.2052	87-0721	82.342	Fe	211	
64.9043	87-0721	65.028	Fe	200	

Perhitungan Microstrain

$$B_m = 0.2676 \times \pi / 180 = 0.00467 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00467^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 4.4225 \times 10^{-3}$$

$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

$$4.4225 \times 10^{-3} = 4\varepsilon \tan 22.27245$$

$$\varepsilon = 2.6995 \times 10^{-3}$$

6. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Quenching

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6523	760.49	0.0612	2.02775	100.00
65.1118	73.32	0.5353	1.43264	9.64
82.5674	102.16	0.6022	1.16846	13.43

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6523	87-0721	44.677	Fe	110	0.0612
82.5674	87-0722	82.531	Fe	211	
65.1118	87-0722	65.166	Fe	200	

Perhitungan Microstrain

$$B_m = 0.0612 \times \pi / 180 = 0.00107 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00107^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = |-1.1051 \times 10^{-6}|^{\frac{1}{2}}$$

$$B = 1.0512 \times 10^{-3}$$

$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

$$1.0512 \times 10^{-3} = 4\varepsilon \tan 22.32615$$

$$\varepsilon = 6.3994 \times 10^{-4}$$

7. Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Quenching

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.8740	845.74	0.1171	2.01992	100.00
65.1498	59.97	0.6691	1.43190	7.09
82.5244	161.90	0.4684	1.16896	19.14

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.8740	87.0722	44.765	Fe	110	0.1171
82.5244	87-0722	82.531	Fe	211	
65.1498	87-0722	65.166	Fe	200	

Perhitungan Microstrain

$$B_m = 0.1171 \times \pi / 180 = 0.00204 \text{ rad}$$

$$B_s = 0.086 \times \pi / 180 = 0.0015 \text{ rad}$$

$$B = (B_m^2 - B_s^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (0.00204^2 - 0.0015^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$B = (1.9116 \times 10^{-6})^{\frac{1}{2}}$$

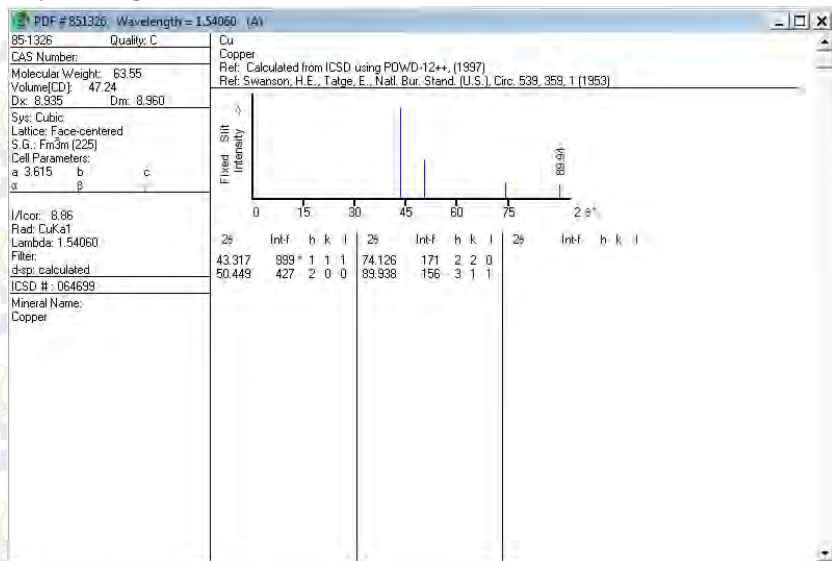
$$B = 1.3826 \times 10^{-3}$$

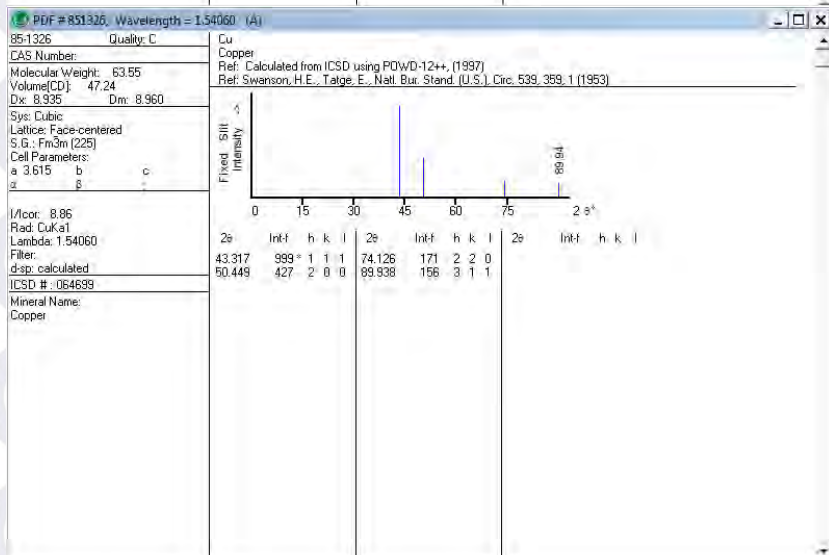
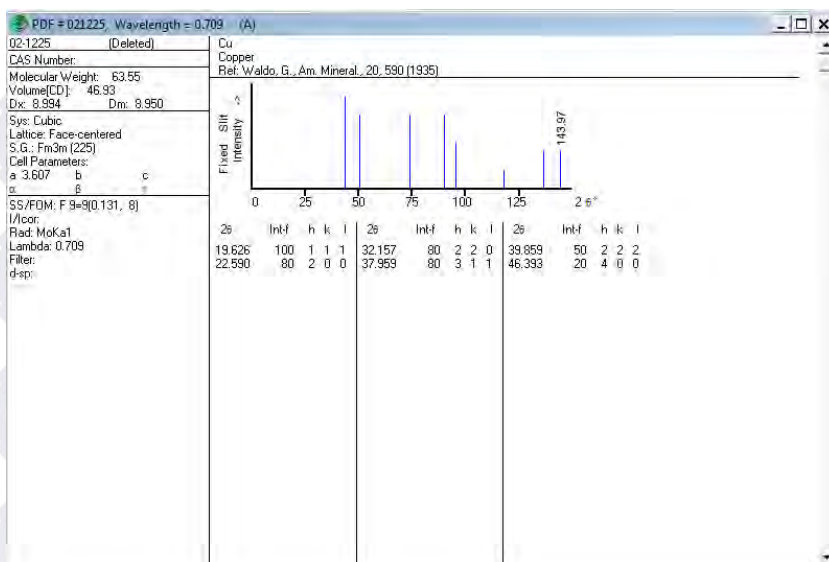
$$B = 4\varepsilon \tan\theta$$

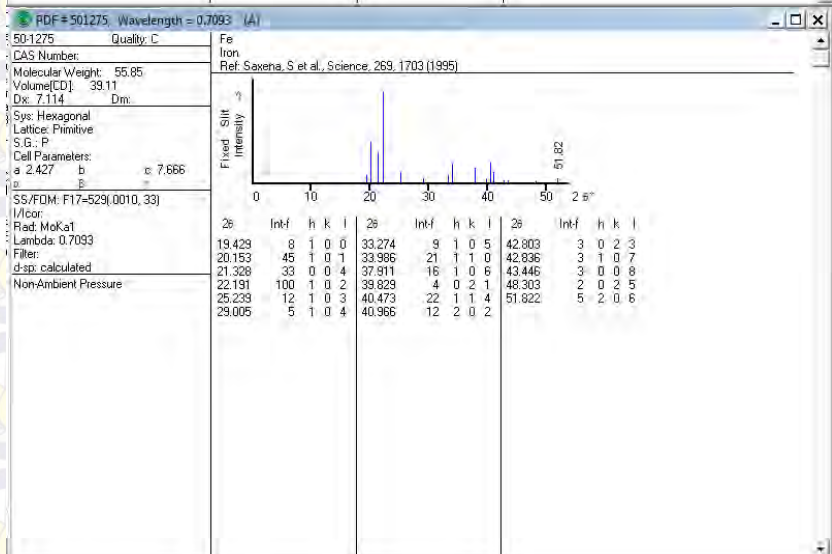
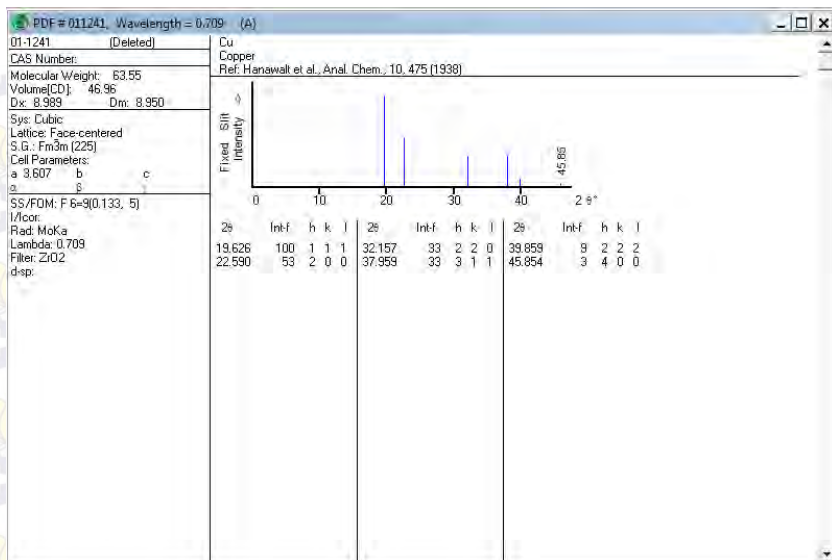
$$1.3826 \times 10^{-3} = 4\varepsilon \tan 22.437$$

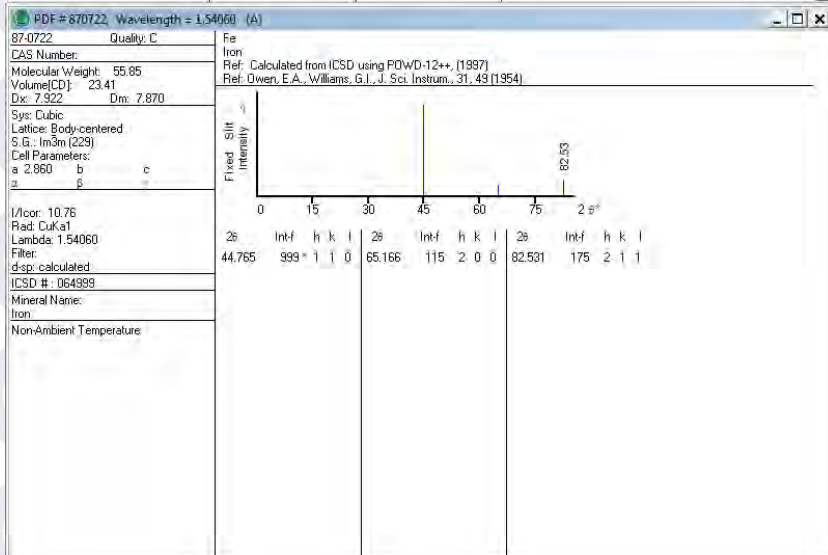
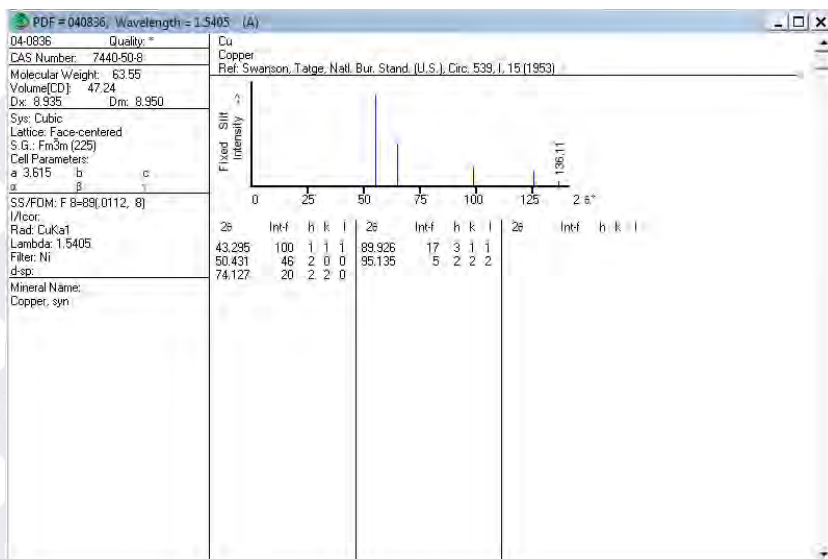
$$\varepsilon = 8.3707 \times 10^{-4}$$

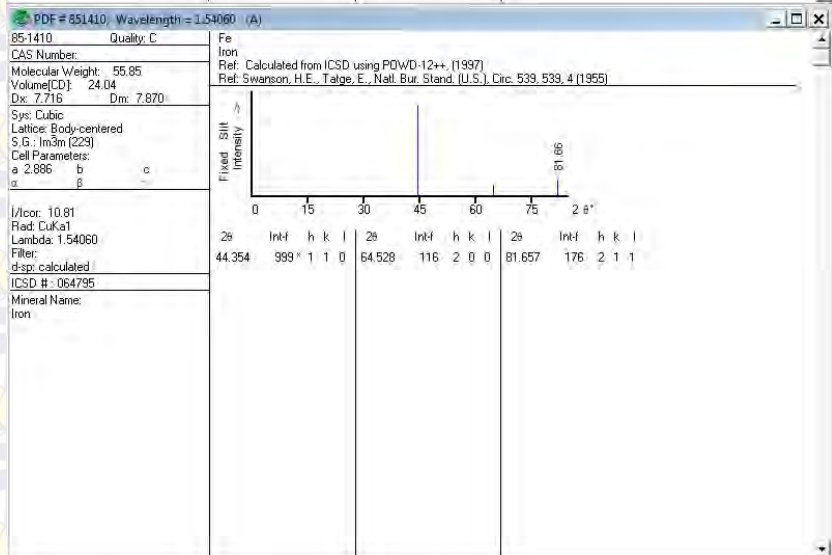
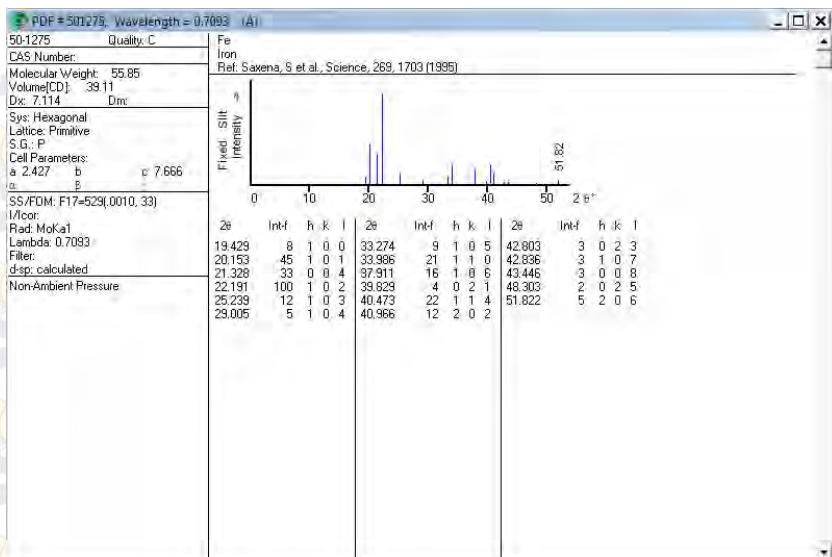
III. PDF CARD

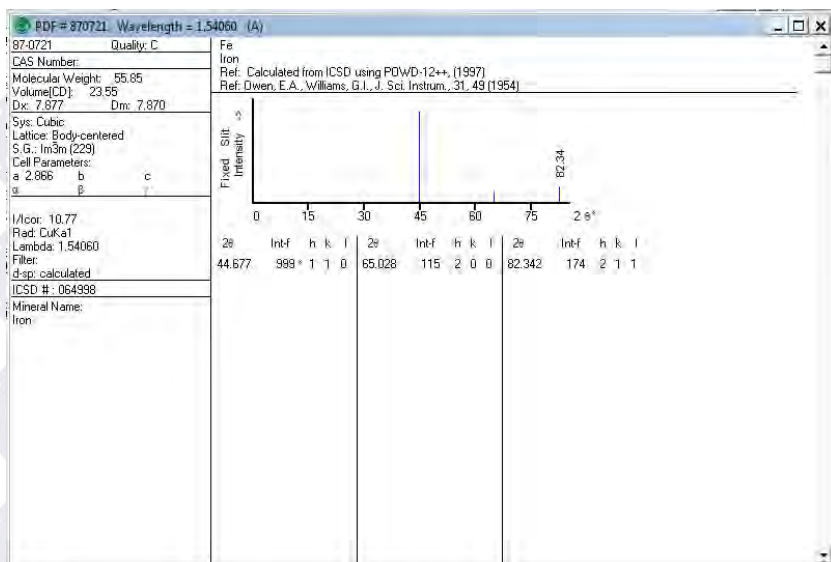












IV. Hasil Uji *Optical Emmission Spectroscopy*

1. Spesimen Awal Tanpa Perlakuan

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 1 Material : CARBON STEEL
Customer : ADHA ISORI HARTATA Dimension : -
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M.THORIQ WAHYUDI
Date: 3/31/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.5	0.0376	0.0205	0.211	0.0064	0.0069	0.0304	< 0.0050
2	99.5	0.0373	0.0199	0.208	0.0062	0.0079	0.0253	< 0.0050
3	99.5	0.0324	0.0195	0.211	0.0066	0.0072	0.0270	< 0.0050
Ave	99.5	0.0358	0.0200	0.210	0.0061	0.0068	0.0276	< 0.0050

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0305	0.0464	< 0.0050	0.0363	0.0103	0.0066	< 0.0050	< 0.0050
2	0.0308	0.0449	< 0.0050	0.0377	0.0122	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	0.0264	0.0450	< 0.0050	0.0364	0.0196	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Ave	0.0292	0.0454	< 0.0050	0.0375	0.0140	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050

	Pb
1	< 0.0050
2	< 0.0050
3	< 0.0050
Ave	< 0.0050

2. Spesimen Copperizing 5 Menit Pendinginan Anil

LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 5A Material :
Customer : Dimension :
Lab-no. : Heat-no. :
Operator : Ka. Laboratorium :
Date :

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	95.2	0.203	0.431	0.242	0.178	> 0.120	0.0366	0.0841
2	91.7	0.197	0.385	0.179	0.210	> 0.120	0.0229	0.0781
3	94.4	0.293	0.339	0.169	0.277	> 0.120	0.0208	0.126
Ave	93.8	0.231	0.385	0.196	0.222	> 0.120	0.0268	0.0961
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	1.36	0.0537	< 0.0050	0.232	0.0361	0.0088	0.0088	0.939
2	4.93	0.0361	< 0.0050	0.149	0.0273	0.0124	0.0069	0.741
3	1.83	0.0376	< 0.0050	0.240	0.0287	0.0149	0.0123	0.900
Ave	2.71	0.0425	< 0.0050	0.207	0.0307	0.0120	0.0094	0.860
	Pb							
1	> 0.150							
2	> 0.150							
3	> 0.150							
Ave	> 0.150							

3. Spesimen Copperizing 7 Menit Pendinginan Anil

LITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
BORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 7A

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
99.1	0.0573	0.0151	0.223	0.0191	0.0088	0.0313	0.0036
99.2	0.0632	0.0153	0.228	0.0183	0.0091	0.0311	0.0036
99.2	0.0616	0.0141	0.239	0.0173	0.0090	0.0317	0.0056
99.2	0.0607	0.0148	0.230	0.0182	0.0090	0.0314	0.0043
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
0.0297	0.0408	< 0.0005	0.347	0.0138	0.0012	0.0028	0.0036
0.0289	0.0424	0.0005	0.282	0.0040	0.0020	0.0025	0.0146
0.0290	0.0432	< 0.0005	0.201	0.0123	< 0.0010	0.0046	0.0159
0.0292	0.0421	< 0.0005	0.277	0.0100	0.0011	0.0033	0.0114
Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
0.0020	0.0016	< 0.0001	0.0008	0.0079	0.0006	0.0023	0.0011
0.0025	< 0.0005	< 0.0001	0.0007	0.0089	0.0009	0.0037	0.0045
0.0022	0.0017	0.0003	0.0007	0.0099	0.0011	0.0035	0.0035
0.0023	0.0013	0.0001	0.0008	0.0089	0.0009	0.0032	0.0030
N	Se	Sb	Ta				
< 0.0030	< 0.0010	0.0022	0.0089				
< 0.0030	< 0.0010	0.0059	0.0089				
< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	0.0082				

4. Spesimen *Copperizing* 5 Menit Pendinginan Normal

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : NORMALIZING Material : CARBON STEEL
Customer : Sdr. TIO (TEKNIK MATERIAL & MDimension :)
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. :
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
Date: 9/14/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.3	0.0098	0.0591	0.174	0.0406	0.0326	0.0320	0.0072
2	99.4	0.0082	0.0422	0.176	0.0316	0.0236	0.0286	0.0063
3	99.2	0.0117	0.0664	0.170	0.0329	0.0281	0.0382	0.0090
4	99.3	0.0126	0.0646	0.173	0.0318	0.0253	0.0336	0.0093
Ave	99.3	0.0112	0.0573	0.175	0.0335	0.0288	0.0334	0.0081
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0697	0.0405	0.0016	0.157	0.0017	0.0247	0.0015	0.0094
2	0.0659	0.0395	0.0015	0.115	0.0090	0.0159	0.0017	0.0142
3	0.0810	0.0443	0.0016	0.136	< 0.0010	0.119	< 0.0010	0.0189
4	0.0740	0.0425	0.0013	0.122	< 0.0010	0.0755	< 0.0010	0.0036
Ave	0.0697	0.0417	0.0015	0.128	0.0021	0.0615	0.0012	0.0101
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	0.0018	0.0040	< 0.0001	0.0017	0.0041	< 0.0001	0.0038	< 0.0005
2	0.0018	0.0028	< 0.0001	0.0012	0.0040	< 0.0001	0.0011	< 0.0005
3	0.0081	0.0028	< 0.0001	0.0021	0.0044	< 0.0001	0.0039	0.0008
4	0.0031	0.0027	< 0.0001	0.0017	0.0035	< 0.0001	0.0043	< 0.0005
Ave	0.0037	0.0030	< 0.0001	0.0016	0.0040	< 0.0001	0.0031	< 0.0005
	N	Se	Sb	Ta				
1	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
2	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
3	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
4	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
Ave	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				

5. Spesimen *Copperizing* 7 Menit Pendinginan Normal

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 7N

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER

Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.3	0.0941	0.0162	0.194	0.0123	0.0091	0.0228	< 0.0050
2	99.3	0.106	0.0173	0.193	0.0118	0.0074	0.0205	< 0.0050
3	99.3	0.110	0.0154	0.194	0.0111	0.0085	0.0207	< 0.0050
Ave	99.3	0.103	0.0163	0.194	0.0117	0.0083	0.0213	< 0.0050

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0221	0.0431	< 0.0050	0.195	0.0059	< 0.0050	< 0.0050	0.0073
2	0.0235	0.0425	< 0.0050	0.237	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	0.0193	0.0412	< 0.0050	0.198	0.0067	< 0.0050	< 0.0050	0.0074
Ave	0.0216	0.0423	< 0.0050	0.210	0.0053	< 0.0050	< 0.0050	0.0063

	Pb
1	< 0.0050
2	< 0.0050
3	< 0.0050
Ave	< 0.0050

6. Spesimen Copperizing 5 Menit Pendinginan Quench

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

5 menit

Sample ID : QUENCHING Material : CARBON STEEL
Customer : Sdr. TIO (TEKNIK MATERIAL & MDimension :)
Lab-no. : UJI BAHAN Heat-no. :
Operator : ELHAM Ka. Laboratorium : M. THORIQ WAHYUDI
Date: 9/14/2015

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.5	0.0037	0.0300	0.187	0.0174	0.0115	0.0238	0.0034
2	99.5	0.0032	0.0262	0.188	0.0157	0.0104	0.0249	0.0041
3	99.5	0.0053	0.0216	0.194	0.0147	0.0098	0.0245	0.0039
4	99.4	0.0092	0.0262	0.183	0.0186	0.0109	0.0231	0.0029
Ave	99.5	0.0063	0.0258	0.188	0.0161	0.0105	0.0240	0.0033
	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0364	0.0409	0.0013	0.0792	< 0.0010	0.0021	< 0.0010	< 0.0010
2	0.0318	0.0408	0.0013	0.0640	0.0016	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0010
3	0.0283	0.0398	0.0011	0.0609	0.0066	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0010
4	0.0401	0.0384	0.0013	0.0773	0.0067	0.0770	0.0012	0.0096
Ave	0.0333	0.0397	0.0012	0.0696	0.0045	0.0253	< 0.0010	0.0029
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	< 0.0010	0.0010	0.0004	0.0012	0.0057	< 0.0001	0.0010	< 0.0005
2	< 0.0010	0.0005	< 0.0001	0.0007	0.0053	< 0.0001	0.0018	< 0.0005
3	< 0.0010	< 0.0005	0.0001	0.0005	0.0049	< 0.0001	0.0017	< 0.0005
4	< 0.0010	< 0.0005	< 0.0001	0.0008	0.0044	< 0.0001	< 0.0005	0.0006
Ave	< 0.0010	< 0.0005	0.0001	0.0008	0.0050	< 0.0001	0.0011	< 0.0005
	N	Se	Sb	Ta				
1	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
2	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
3	< 0.0030	< 0.0010	0.0058	< 0.0040				
4	< 0.0030	< 0.0010	< 0.0010	< 0.0040				
Ave	< 0.0030	< 0.0010	0.0019	< 0.0040				

7. Spesimen Copperizing 7 Menit Pendinginan Quench

LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 7Q

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

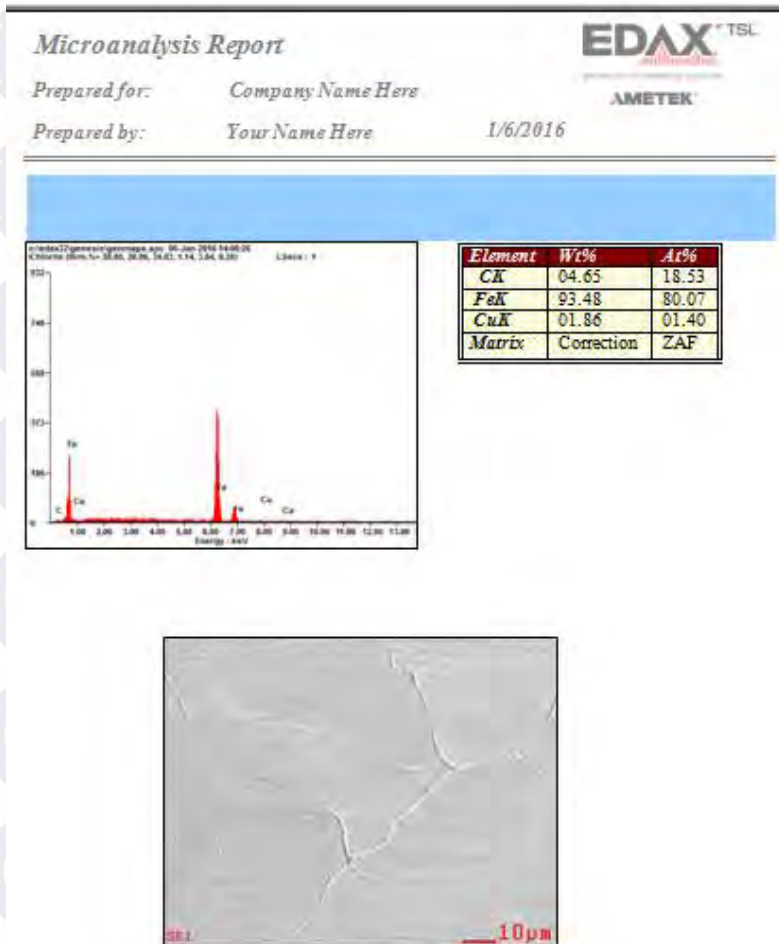
Date:

Spektralanalyse Foundry-MASTER

Grade :

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
99.4	0.0735	0.0221	0.214	0.0139	0.0091	0.0301
99.4	0.0689	0.0194	0.219	0.0141	0.0085	0.0302
99.4	0.0738	0.0174	0.222	0.0145	0.0093	0.0308
99.4	0.0721	0.0196	0.218	0.0142	0.0090	0.0304
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
0.0263	0.0459	< 0.0005	0.0965	0.0135	0.0015	0.0018
0.0261	0.0451	< 0.0005	0.0799	0.0118	< 0.0010	0.0020
0.0267	0.0464	< 0.0005	0.0817	0.0014	0.0019	0.0039
0.0264	0.0458	< 0.0005	0.0860	0.0089	0.0014	0.0026
Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi
0.0018	0.0014	0.0001	0.0006	0.0081	< 0.0001	0.0026
< 0.0010	0.0007	0.0003	0.0004	0.0084	0.0007	0.0028
< 0.0010	0.0005	< 0.0001	0.0004	0.0078	< 0.0001	0.0027
0.0012	0.0009	0.0002	0.0005	0.0081	0.0002	0.0027
N	Se	Sb	Ta			
< 0.0030	0.0037	0.0035	< 0.0040			
< 0.0030	0.0041	< 0.0010	0.0102			
< 0.0030	0.0034	0.0088	0.0135			
< 0.0030	0.0037	0.0041	0.0083			

1. Baja AISI 1006 *Copperizing* 5 Menit Pendinginan Anil



Spotting Spesimen Copperizing 5 Menit Anil

Microanalysis Report

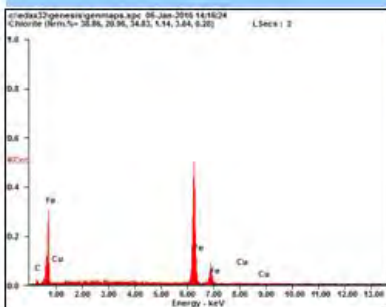
EDAX[®] TSL

Prepared for: Company Name Here

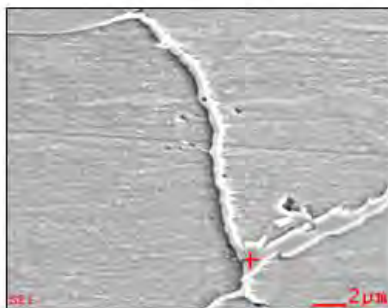
Prepared by: Your Name Here

1/6/2016

AMETEK



Element	Wt%	At%
CK	10.58	35.57
FeK	86.74	62.73
CuK	02.68	01.70
Matrix	Correction	ZAF



2. Baja AISI 1006 *Copperizing* 7 Menit Pendinginan Anil

Microanalysis Report

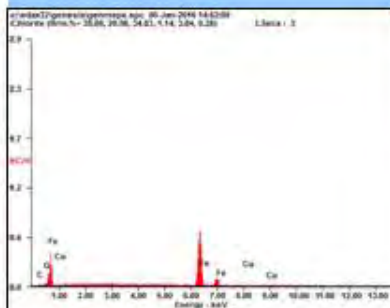
EDAX[™] TSL

Prepared for: Company Name Here

AMETEK

Prepared by: Your Name Here

1/6/2016



Element	Wt%	At%
CK	05.55	20.14
OK	03.28	08.96
FeK	87.99	68.72
CuK	03.18	02.18
Matrix	Correction	ZAF



Spotting Spesimen Copperizing 5 Menit Anil

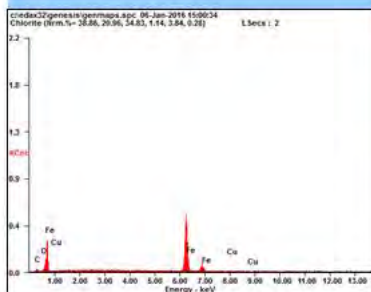
Microanalysis Report



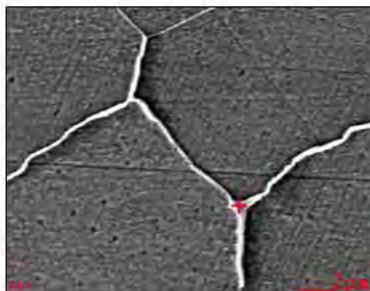
Prepared for: Company Name Here

Prepared by: Your Name Here

1/6/2016



Element	Wt%	At%
CK	10.62	33.21
OK	04.12	09.68
FeK	82.63	55.56
CuK	02.62	01.55
Matrix	Correction	ZAF



3. Baja AISI 1006 Copperizing 5 Menit Pendinginan Normal

Microanalysis Report

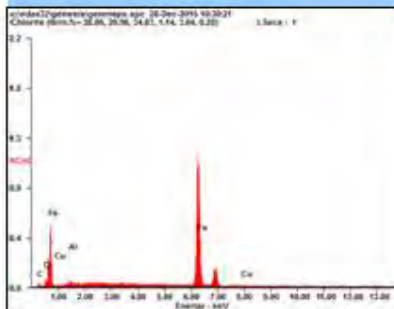
EDAXTM TSL

Prepared for: Company Name Here

AMETEK

Prepared by: Your Name Here

12/28/2015



Element	Wt%	At%
CK	04.28	16.07
OK	02.52	07.11
AlK	02.10	03.51
FeK	88.59	71.53
CuK	02.51	01.78
Matrix	Correction	ZAF



4. Baja AISI 1006 Copperizing 7 Menit Pendinginan Normal

Microanalysis Report

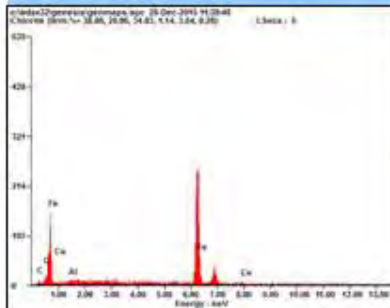
EDAX[™] TSL
performance

Prepared for: Company Name Here

AMETEK

Prepared by: Your Name Here

12/28/2015



Element	Wt%	At%
CK	04.52	16.31
OK	04.22	11.45
AlK	02.05	03.29
FeK	85.40	66.34
CuK	03.81	02.60
Matrix	Correction	ZAF



5. Baja AISI 1006 *Copperizing* 7 Menit Pendinginan *Quench*

Microanalysis Report

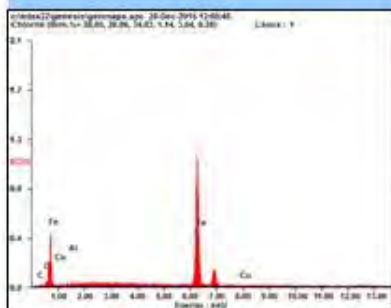
EDAX™ TSL
and ThermoFisher

Prepared for: Company Name Here

AMETEK

Prepared by: Your Name Here

12/28/2015



Element	Wt%	At%
CK	01.49	06.26
OK	01.76	05.56
AlK	00.77	01.44
FeK	93.99	85.15
CuK	01.99	01.59
Matrix	Correction	ZAF



BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Aprida Ulya Cunika yang lahir di Surabaya pada tanggal 3 April 1994. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SD Muhammadiyah GKB, SMP Muhammadiyah 12 GKB, dan SMA Negeri 1 Manyar. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2012.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS sebagai Sekretaris Departemen Keilmiah Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS (HMMT FTI-ITS). Penulis juga merupakan seorang Pemandu TD FTI-ITS setelah lulus pelatihan PP-LKMM VIII. Selain itu penulis juga aktif dalam aktifitas akademik sebagai asisten dosen Fisika Dasar dan asisten laboratorium Praktikum Fisika Dasar. Kegiatan perkuliahan diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan judul **"Pengaruh *Short Immersing Time* dan Laju Pendinginan Proses *Copperizing* Terhadap Perubahan Mikrostruktur dan Perilaku Tembaga Pada Dead Mild Steel"**.

Alamat penulis saat ini adalah Jalan Raya Belitung nomer 5 GKB Kelurahan Randuagung Kecamatan Kebomas Kabupaten Gresik. Nomer telepon yang dapat dihubungi adalah 081703522253 atau alamat email prid.cunika@gmail.com.